



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук

УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ

ТРУДЫ XVIII ВСЕРОССИЙСКОЙ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ



У Б С - 2022
УПРАВЛЕНИЕ
БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ

Челябинск, 5–8 сентября 2022 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук

УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ

**ТРУДЫ XVIII ВСЕРОССИЙСКОЙ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

(5–8 сентября 2022 г., Челябинск)

*Под общей редакцией академика РАН Д.А. Новикова
и заслуженного деятеля науки РФ О.В. Логиновского*

НАУЧНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2022

УДК 658.5
ББК 32.81

Управление большими системами: труды XVIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых, 5–8 сентября 2022 г., Челябинск / под общ. ред. Д.А. Новикова, О.В. Логиновского; Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН, Минобрнауки России. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 28 Мб). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2022. – 1 CD-R. – Систем. требования: Pentium 4; 1,3 ГГц и выше; Internet Explorer; Acrobat Reader 4.0 или выше. – Загл. с титул. экрана. – ISBN 978-5-696-05336-3. – Текст: электронный.

В научном электронном издании представлены труды XVIII Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» по следующим направлениям:

- Управление техническими системами и технологическими процессами
- Информационные технологии и искусственный интеллект в управлении
- Математические основы теории управления
- Управление организационными и социально-экономическими системами

Сборник трудов школы-конференции предназначен для научных работников и специалистов в области управления.

Материалы статей предоставлены в электронном виде и сохраняют авторскую редакцию

Утверждено к изданию Программным комитетом конференции

DOI: <http://dx.doi.org/10.14529/ubs2022>

ISBN 978-5-696-05336-3

© Издательский центр ЮУрГУ, 2022

ОБЩЕЕ РУКОВОДСТВО

Новиков Дмитрий Александрович – академик РАН, директор ФГБУН Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, д.т.н., профессор;

Вагнер Александр Рудольфович – и.о. ректора ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»;

Шестаков Александр Леонидович – президент ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», д.т.н., профессор, председатель Совета ректоров УрФО.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- **Краснова Светлана Анатольевна**, сопредседатель программного комитета, заместитель директора ИПУ РАН, д.т.н., профессор;
- **Голлай Александр Владимирович**, сопредседатель программного комитета, директор Высшей школы электроники и компьютерных наук ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», д.т.н.;
- **Баркалов Сергей Алексеевич**, декан факультета экономики, менеджмента и информационных технологий, заведующий кафедрой «Управление строительством» ФГБОУ ВО «ВГТУ», д.т.н., профессор;
- **Воронин Александр Александрович**, заведующий кафедрой фундаментальной информатики и оптимального управления ФГАОУ ВО «ВолГУ», д.ф.-м.н., профессор;
- **Гераськин Михаил Иванович**, заведующий кафедрой математических методов в экономике, ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева», д.э.н., профессор;
- **Громов Юрий Юрьевич**, директор Института автоматизации и информационных технологий ФГБОУ ВО «ТГТУ», д.т.н., профессор;
- **Губко Михаил Владимирович**, главный научный сотрудник ИПУ РАН, д.ф.-м.н., профессор РАН;
- **Ильясов Барый Галеевич**, профессор кафедры технической кибернетики ФГБОУ ВО «УГАТУ», д.т.н., профессор;
- **Краснянский Михаил Николаевич**, член-корреспондент РАЕН, ректор ФГБОУ ВО «ТГТУ», д.т.н., профессор;
- **Логиновский Олег Витальевич**, заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», д.т.н., профессор;

- **Мещеряков Роман Валерьевич**, директор Центра интеллектуальных робототехнических систем ИПУ РАН, д.т.н., профессор РАН;
- **Муромцев Дмитрий Юрьевич**, проректор по научно-инновационной деятельности ФГБОУ ВО «ТГТУ», д.т.н., профессор;
- **Пакшин Павел Владимирович**, заведующий кафедрой прикладной математики ФГБОУ ВО «АПИ НГТУ», д.ф.-м.н., профессор;
- **Погодаев Анатолий Кириянович**, первый проректор ФГБОУ ВО «ЛГТУ», д.т.н., профессор;
- **Столбов Валерий Юрьевич**, заведующий кафедрой вычислительной математики, механики и биомеханики ФГАОУ ВО «ПНИПУ», д.т.н., профессор;
- **Угольницкий Геннадий Анатольевич**, заведующий кафедрой прикладной математики и программирования ФГАОУ ВО «ЮФУ», д.т.н., профессор;
- **Чукин Михаил Витальевич**, ректор ФГБОУ ВО «МГТУ», д.т.н.;
- **Южаков Александр Александрович**, заведующий кафедрой автоматики и телемеханики ФГАОУ ВО «ПНИПУ», д.т.н., профессор.

ОРГКОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

- **Шестаков Александр Леонидович** – президент ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», д.т.н., профессор, председатель Совета ректоров УрФО;
- **Голлай Александр Владимирович** – директор Высшей школы электроники и компьютерных наук ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», д.т.н.;
- **Логиновский Олег Витальевич** – заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», д.т.н., профессор;
- **Бунова Елена Вячеславовна** – заместитель директора центра коллективной работы «Университетская Точка кипения» «ЮУрГУ (НИУ)»;
- **Захаров Вадим Владимирович** – заместитель директора Высшей школы электроники и компьютерных наук ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»;
- **Зайцев Андрей Владимирович** – заведующий сектором веб-проектов ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»;
- **Серова Влада Сергеевна** – помощник директора Высшей школы электроники и компьютерных наук ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

СОДЕРЖАНИЕ

Секция I. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

<u>Блинов А.В., Голлай А.В. Анализ рынка экопродуктов</u>	11
<u>Голобурдин Н.В., Анисимов Р.О., Даукаев Р.И., Бакаев В.С. Решение задачи обработки полей группой БПЛА</u>	20
<u>Даукаев Р.И., Мостаков Н.А., Голобурдин Н.В., Анисимов Р.О. Программно-аппаратная часть беспилотного летательного аппарата в задаче кормления рыб</u>	27
<u>Диане С.А.К., Исхаков А.Ю., Исхакова А.О. Управление перемещением группы мобильных роботов в условиях информационных ограничений</u>	35
<u>Дуванов Е.С., Захарова Е.М., Пащенко А.Ф., Хижинская Л.Д. Умные технологии в железнодорожном транспорте</u>	42
<u>Каракулов И.В., Столбов В.Ю. Классификация технического состояния насосного оборудования с использованием методов искусственного интеллекта</u>	50
<u>Кокунько Ю.Г. Синтез генератора задающих воздействий для системы управления мобильным роботом</u>	56
<u>Костючек М.И. Оптимальное управление фильтрацией газа при постоянном термодинамическом потенциале</u>	64
<u>Костылева Л.Ю., Логиновский О.В. Моделирование процессов активного теплового контроля многослойных биметаллических пластин</u>	70
<u>Кочетков С.А. Релейное управление преобразователем трехфазного напряжения в постоянное</u>	78
<u>Кузнецов П.Ю. Калибровка трехосного магнитометра с привязкой к осям акселерометров</u>	85
<u>Куприков О.Д., Команич Д.В. Исследование и имитационное моделирование характеристик гидроакустического канала связи</u>	91
<u>Латинов А.Р., Ахметзянов А.В. Использование библиотеки tensorflow для расчета распределения давления при добыче газа</u>	99
<u>Мамонтова А.А., Сухоруков А.А. Разработка инструментальных средств для экспериментального исследования микроструйного генератора</u>	105
<u>Мостаков Н.А., Голобурдин Н.В., Бакаев В.С., Кулагин К.А. Разработка системы моделирования процесса автоматического прикорма рыб при помощи БПЛА</u>	114
<u>Начевский И.В., Андрианова О.Г., Слепцов Э.С. Идентификация динамики многозвенного робота-манипулятора с помощью дифференциальных нейросетей с нестационарными ограничениями</u>	121
<u>Носков Н.О., Галкин В.А., Макаренко А.В. Исследование возможности автоматизации процесса калибровки камеры по видеоданным на основе коэффициентов кривизны</u>	128
<u>Онискив В.Д., Яковлев А.Ю. Задача оптимизации процесса производства радиационно-сшитого полиэтилена</u>	135

<u>Полякова М.А., Ширяева Е.Н. Корректировка режимов охлаждения стального проката для эмалирования на основе математических моделей марковских процессов</u>	143
<u>Рябушев Е.А. Механика токопроводящих сплошных сред</u>	151
<u>Саломатин А.А. Алгоритм оптимального группового управления БПЛА в задаче покраски наружных стен зданий</u>	157
<u>Сомов М.Л., Барашов Е.Б., Лемтюжникова Д.В. Задача оптимизации разгрузки судов на причалах угольного терминала для морских портов дальнего востока России</u>	163
<u>Топольский Д.В., Топольский Н.Д. Оптимизация обработки потоков данных в интеллектуальных системах учета электроэнергии</u>	171
<u>Тевяшов Г.К. Перспективы использования различных каналов связи подводной РТС и оператора</u>	178
<u>Сторожев С.А., Южаков А.А. Групповое управление переопределенными объектами на базе нечеткой логики</u>	186
<u>Третьякова Е.А. Моделирование гидроудара в аксиально-плунжерном насосе</u>	194
<u>Трефилов П.М. Формирование математических моделей погрешностей инерциальной навигационной системы для задач ориентации и навигации БПЛА в среде MATLAB</u>	202
<u>Тутуров А.А. Разработка графического интерфейса суточного цикла управления космическим аппаратом для космического комплекса как социо-киберфизической системы</u>	209
<u>Филинков Л.И., Лихтер А.М. Исследование критерия суммарного эколого-экономического параметра котельного агрегата</u>	216
<u>Фомин А.В., Жуков П.И. Применение регрессионного анализа в задаче получения зависимости расхода газа в зонах печи от производительности прокатного стана</u>	223
<u>Хаданович Д.В. Применение гарантированного подхода в задаче измерения сопротивления постоянному току обмоток трансформаторов</u>	229
<u>Широков А.С. Задача управления гетерогенной группой роботов с целью посадки БПЛА на формируемую корпусами наземных роботов платформу</u>	238
<u>Шушко Н.И., Губко М.В. Алгоритм приближенного динамического программирования на основе анализа возмущений для задачи оптимизации режимов электрических сетей со многими накопителями электроэнергии</u>	243

Секция II. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В УПРАВЛЕНИИ

<u>Алексеева И.Е., Болотова О.Ю. Рекомендательная система для архитекторов и дизайнеров при разработке колерных паспортов объектов капитального строительства</u>	249
<u>Алексеева И.Е., Болотова О.Ю., Тетерин М.Н. Исследование колористических особенностей оформления фасадов зданий дошкольных образовательных учреждений с учетом эмоциональной оценки изображений</u>	254

<u>Анисимов Р.О., Кулагин К.А., Гладких Т.Я., Мостаков Н.А. Разработка и тестирование алгоритма для решения задач детектирования людей с помощью лазерного дальномера</u>	260
<u>Банников Р.Ю., Нетбай Г.В., Онискив В.Д., Столбов В.Ю. Особенности использования нейросетевой модели при прогнозном управлении городской сетью теплоснабжения</u>	272
<u>Беляков А.Е., Бородина О.С., Барташевич Е.В., Топольский Д.В. Организация хранения и поиска информации о свойствах атомно-молекулярных систем для построения цифровых двойников материалов</u>	278
<u>Блинова О.В., Цыникин А.В. Разработка среды для быстрого проектирования временных сетей связи с учетом рельефа местности и траекторий движения</u>	286
<u>Галкин В.А., Макаренко А.В. Исследование алгоритмов оценивания плотности скопления объектов (в приложении к сельскохозяйственным задачам)</u>	292
<u>Галяев А.А., Медведев А.И., Насонов И.А. Об одной задаче нейросетевого перехвата движущейся цели</u>	300
<u>Журавлев И.И., Милосердов О.А., Макаренко А.В. Исследование поведения представлений изображений, не принадлежащих исходному домену, в специальных подпространствах формы и текстуры</u>	304
<u>Карпета Т.В., Ческидова М.А. Применение синтеза речи для управления и развития бизнеса</u>	312
<u>Кожемякин Л.В., Никитин В.Н., Алексеев А.О. Применение корней принятия решений для определения взаимосвязи между магнитной восприимчивостью вен головного мозга и наличием болезни Альцгеймера</u>	318
<u>Коновалов К.Д., Олейников В.С., Хохловский В.Н. Разработка цифрового двойника объекта теплоснабжения с применением рекуррентных нейронных сетей</u>	325
<u>Кудинов И.Д. Построение модели морфологического анализатора для русского языка на основе системы правил</u>	331
<u>Кулакова А.Д., Галкин В.А., Макаренко А.В. Решение задачи классификации томатов по спелости на основе распределения цвета с помощью нейронной сети</u>	336
<u>Милосердов О.А., Макаренко А.В. Решение задачи распознавания медицинских масок на лицах людей в сложных условиях по принятию решения</u>	344
<u>Орлова К.Ю., Абрамов А.М. Оценка эффективности автоматизации процесса обработки кредитной заявки банком</u>	353
<u>Овсянницкий А.Д., Сипатов М.А., Салахиев Р.Р. О создании информационной системы управления процессом создания и реализации медицинских рецептов с использованием SMART-контрактов</u>	361
<u>Русаков К.Д., Мамченко М.В., Тевяшов Г.К. Распознавание рукописных русских слов с помощью глубокого обучения</u>	367
<u>Сычева А.А., Толоч А.В. Компьютерное моделирование функции сферы методом функционально-воксельного моделирования</u>	375
<u>Хапкин Д.Л., Феофилов С.В., Козырь А.В. Исследование устойчивости нейросетевого управления на основе смешанного линейного целочисленного программирования</u>	384

<u>Чаплинская Н.В. Моделирование импульсной нейронной сети с пластичными синаптическими задержками</u>	391
<u>Яковлев И.А., Елизарова А.В. Оптимизация архитектуры нейронной сети в задаче оценки состояния заряда аккумулятора</u>	399

Секция III. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

<u>Атуова А.М. Задача обхода машиной Дубинса трех неподвижных точек за кратчайшее время</u>	407
<u>Берлин Л.М., Галяев А.А. Непрерывность критерия в задаче быстрогодействия двух несинхронных осцилляторов</u>	412
<u>Вольных М.М. Алгебра дифференциальных инвариантов линейных уравнений теплопроводности в неоднородных средах</u>	418
<u>Глуценко А.И., Ласточкин К.А. Адаптивное управление углами Эйлера квадрокоптера на основе эталонной модели с нейросетевой компенсацией параметрической неопределенности</u>	423
<u>Глуценко А.И., Ласточкин К.А. Процедура определения переключений параметров линейных систем</u>	432
<u>Жуков И.П., Глуценко А.И., Фомин А.В. Сравнение эффективности «обучения» сеточной модели нестационарной теплопроводности при различных целевых функциях</u>	440
<u>Иванова М.В. Статистическая модель оценки полезности жилой недвижимости</u>	449
<u>Замышляева А.А., Цыпленкова О.Н. Восстановление динамически искаженных сигналов методами теории оптимального управления</u>	458
<u>Каршаков Е.В., Гараков Е.А. Решение задачи быстрогодействия при построении алгоритмов управления движением вдоль фрагментарной траектории</u>	463
<u>Козлова М.Г., Лукьяненко В.А., Макаров О.О., Матковский В.А. Разработка алгоритмов многоагентной иерархической маршрутизации</u>	469
<u>Краснов Д.В. Построение редуцированных наблюдателей состояния для систем с аффинными возмущениями</u>	476
<u>Лысов С.С. Разработка математической модели макета псевдоспутниковой системы</u>	485
<u>Макаровских Т.А., Аботалев М.С.А. Система прогнозирования для одномерных временных рядов</u>	493
<u>Мухина С.С. Задача Коши уравнений фильтрации суспензии в глубоком пористом слое и ее визуализация</u>	502
<u>Панюкова А.А., Макаровских Т.А. Распределение комплекса работ по исполнителям</u>	510
<u>Петров И.В. Управление структурой взаимодействия и задача противоборства в играх с линейным наилучшим ответом</u>	518
<u>Потапов А.П. Задача быстрогодействия по остановке маятника с подвижным подвесом</u>	523

<u><i>Починская В.А., Топольский Д.В.</i> Применение озера данных для реализации технологии цифровых двойников химических соединений и материалов.....</u>	530
<u><i>Проворченко Н.И., Лемтюжникова Д.В.</i> Применение метрик в задаче минимизации временного смещения для одного прибора.....</u>	535
<u><i>Рыжов М.С.</i> Предпочтительное присоединение в задаче распространения сообщений в случайном графе.....</u>	540
<u><i>Сергеев В.А.</i> Идентификация механизмов комплексного оценивания с применением разделительной декомпозиции.....</u>	546
<u><i>Ткачева О.С., Рассадин Ю.М.</i> Поведение траекторий трехмерной системы эпидемии в окрестности точек покоя.....</u>	553
<u><i>Хомутов Д.К.</i> Исследование асимптотического поведения многоагентных систем с пропорциональным изменением влияния к фиксированному агенту.....</u>	558
<u><i>Шатов Д.В., Поляк Б.Т., Хлебников М.В.</i> Синтез ПИД-регуляторов следящих систем по квадратичному критерию.....</u>	564

Секция IV. УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

<u><i>Волгина О.А., Нечаева П.А.</i> Имитационная модель взаимодействия агентов социальной сети с использованием различных моделей графов.....</u>	569
<u><i>Козицин И.В.</i> Моделирование процессов информационного противоборства: теория аргументных взаимодействий и фейковые новости.....</u>	576
<u><i>Команич Н.В.</i> Управление инновационным развитием нефтегазовой отрасли: проблемы и поддержка на основе сценарного подход.....</u>	585
<u><i>Корепанов В.О., Блохина А.И.</i> Исследование изменения поведения человека в экспериментальных играх с различными механизмами распределения ресурса.....</u>	593
<u><i>Котюков А.М.</i> Об устойчивости и неединственности положения равновесия в статической модели открытого рынка.....</u>	601
<u><i>Лайко А.Э.</i> Разработка модели управления фазами жизненного цикла организационной системы.....</u>	607
<u><i>Нечаева П.А., Волгина О.А.</i> Моделирование паттернов распространения активности в социальных сетях на основе взаимодействий тiто-агентов.....</u>	615
<u><i>Никаноров С.О.</i> Устойчивость положения равновесия в модели Вальраса-Эванса-Самуэльсона.....</u>	623
<u><i>Рей А.С.</i> Разработка алгоритма оценки рисков распространения деструктивного контента в социальной сети «ВКонтакте».....</u>	628
<u><i>Селезнева И.Е., Клочков В.В.</i> Управление структурой организации научной и образовательной сфер с учетом специфики научно-технических направлений.....</u>	636
<u><i>Серова В.С., Бунова Е.В., Голлай И.Н.</i> Анализ методов категоризации текстовых данных на примере обработки обращений, поступивших на горячую линию Президента РФ.....</u>	644
<u><i>Федосеев С.А., Горбунов Д.Л.</i> Управление персоналом предприятия на основе системно-динамических моделей и программных инструментов.....</u>	652

<u>Федянин Д.Н. Применение модели Фрэнча к модели Грановеттера</u>	659
<u>Фейзов В.Р. Будущее криптовалюты как средства платежа в России</u>	664
<u>Чугайнова А.М. Исследование модели прогнозирования банкротства предприятий строительной отрасли</u>	670
<u>Широкий А.А., Федяева А.В., Исянова А.М. Сценарный подход к управлению региональной системой здравоохранения</u>	677

СЕКЦИЯ I
УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

УДК 338.242.2

АНАЛИЗ РЫНКА ЭКОПРОДУКТОВ

А.В. Блинов, А.В. Голлай

Актуальность статьи обусловлена повышением востребованности потребителями органических продуктов питания. Целью исследования является анализ российского рынка эко продуктов питания, выявление потребительских предпочтений. В качестве методов исследования использовались: систематизация и обобщение научных публикаций по теме исследования, графическое представление статистической информации, логическое обобщение выводов. Проведенный анализ показал, что увеличиваются объемы производства и рынка органической продукции, но, несмотря на рост рынка эко продуктов в России, его потенциал еще не используется, поскольку доля органического земледелия в России составляет всего 0,3 %. Показана необходимость совершенствования государственной политики в данной сфере для формирования благоприятных условий для производителей, а также маркетинговых стратегий для предприятий.

Ключевые слова: органическое земледелие; потребительское поведение; экологизация; управление; маркетинговые стратегии; качество продукции; органическая продукция; продукты питания.

В последние годы рынок органических продуктов питания претерпел значительные изменения. В основном, это связано с изменением потребительских ожиданий в отношении пищевых продуктов. Люди все больше осознают, что они хотят потреблять в пищу экологически чистые продукты, что повышает интерес к продуктам питания, произведенным из сырья предприятий, работающих на основе органических методов. Можно согласиться с Б. Шиватхану, что это результат увеличения доходов и экологической сознательности общества [4]. Указанные выше обстоятельства повышает интерес к «органическим продуктам» со стороны сельхозпроизводителей, переработчиков и продавцов. Экологическое пищевое сырье поступает из хозяйств, где производство и выращивание происходит без применения искусственных удобрений или химических средств защиты растений. Следовательно, экопродукты должны соответствовать строгим требованиям качества. Слабым местом

такой продукции является ее высокая цена, обусловленная более высоким качеством и меньшими масштабами производства [10].

Можно согласиться с исследователями, считающими, что потребители положительно относятся к органическим продуктам питания, которые они чаще всего описывают как «полезные для здоровья», «безопасные», «высококачественные», «с высокой питательной ценностью», «внушающие доверие», но также все чаще обращаются к этическим аспектам, связанным с производством и распространением продуктов питания [11]. Кроме того, как и потребители продуктов питания в других странах, они ищут «качество по хорошей цене» и готовы платить больше за органические продукты, которые соответствуют их ожиданиям не только с точки зрения ценового уровня или органолептической ценности. Одновременно с этим растет значение местного происхождения продуктов питания, увеличивается интерес к закупке продуктов питания у поставщиков с короткими цепочками поставок.

К сожалению, эко продукция по-прежнему составляют лишь 0,5% всей покупательской корзины среднестатистического потребителя. Тем не менее, такая небольшая доля экологических продуктов во всей покупательской корзине в сочетании с динамичным ростом стоимости отрасли и растущим интересом клиентов, которые хотят делать осознанный выбор в пользу здоровья, позволяют утверждать о том, что в ближайшее время рынок эко продуктов будет расти.

Растущий спрос на органические продукты питания, который увеличивается из года в год, идеально вписывается в экологизацию мировой экономики. Во всем мире становится все больше производителей, выбирающих этот способ производства продуктов питания, а также растет число потребителей, ценящих высокое качество продукции [1]. Эти тенденции заметны и в нашей стране, хотя проблем в данной сфере еще много. Вышеуказанное подтверждает актуальность цели настоящей статьи, которая заключается в изучении тенденций и закономерностей рынка эко продуктов и разработке направлений развития производства органической продукции в России, где все больше внимания уделяется качеству продуктов питания, граждане обеспокоены растущим загрязнением окружающей среды и его влиянием на здоровье. В результате увеличивается недоверие к пищевой и сельскохозяйственной продукции, которая содержит химикаты, и поэтому усиливается интерес к органическим продуктам.

Несмотря на данные тенденции в России развитие рынка экопродуктов происходит недостаточно эффективно и отстает от аналогичных процессов в развитых странах, в некоторой степени, это связано с недостатком отечественных исследований в данной сфере. Экономический анализ развития рынка органической продукции, проводимый зарубежными и

российскими исследователями, можно разделить на несколько групп: изучение финансовых показателей органических сельскохозяйственных предприятий [2], рассмотрение тенденций и динамики спроса и предложения органической экопродукции [3, 4], исследование способов и форм реализации органической продукции [5, 6], интенсивности покупки органической продукции, факторов и мотивов покупки [7, 8], изучение цен на органическую продукцию [9] и др. Данная научная литературы рассматривает специфику рынка эко продукции и тенденции развития, но они фрагментарны, что делает тему настоящей статьи актуальной, потому что данные, полученные в ходе исследования, помогут раскрыть особенности развития российского рынка эко продукции, выявить возможности производителей органических продуктов питания, сформировать предпосылки для повышения их конкурентоспособности.

Рынок органических продуктов в России является одним из наиболее динамично развивающихся секторов агробизнеса, однако доля этих продуктов недостаточно высока [6]. Тенденция роста оценивается в 10-20%, а это быстрее роста, чем в среднем по пищевой отрасли (рис. 1).

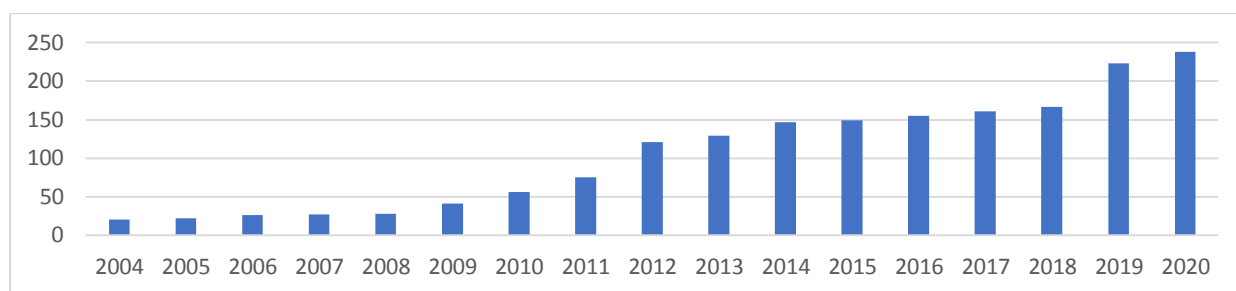


Рис. 1. Динамика российского рынка органической продукции, млн евро [10]

Несмотря на положительную динамику российского рынка экопродуктов, характеризующейся ежегодным ростом, площадь органических сельскохозяйственных угодий небольшая (рис. 2).

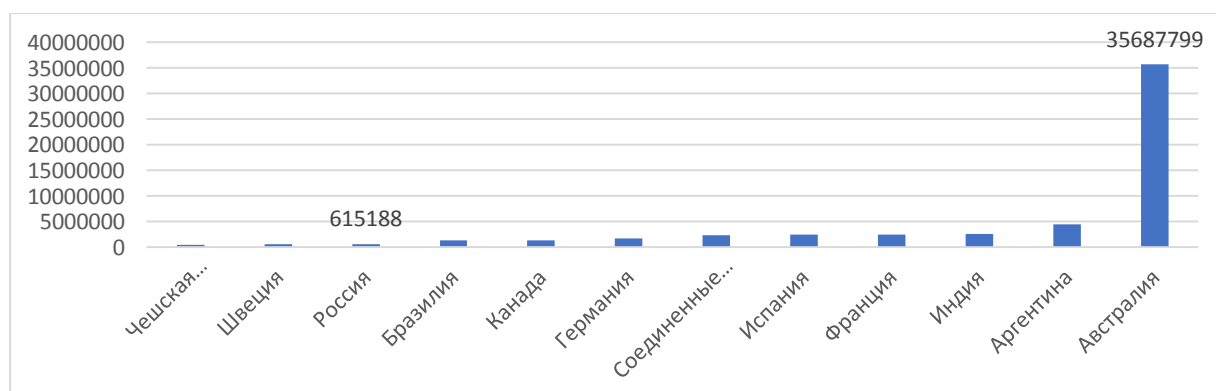


Рис. 2. Площадь органических сельскохозяйственных угодий, га [10]

Данные рис. 2 демонстрирует, что в России 615188 гектаров органических угодий, что составляет всего 0,3 % общей площади земель сельскохозяйственного назначения (рис. 3).

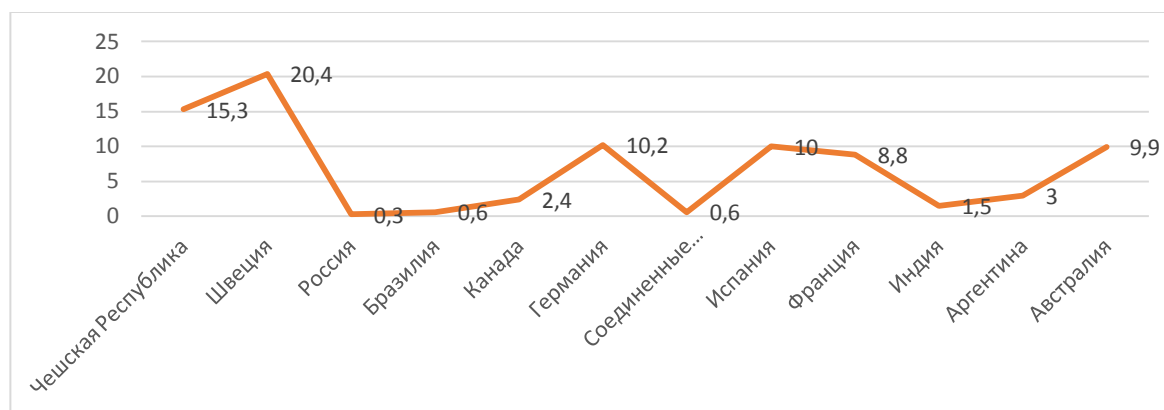


Рис. 3. Доля органического земледелия к общей площади сельскохозяйственных угодий, % [10]

Можно отметить, что в сравнении с отдельными странами в России доля органического земледелия намного меньше, например, в Чехии этот показатель равен 15,3%, а в Швеции – 20,4 %. Это говорит о том, что существующий потенциал в нашей стране в настоящее время не используется. Это несоответствие указывает на то, что мы мало знаем о рынке органических продуктов и что у нас есть проблемы с определением того, что он на самом деле охватывает. Продукты питания, полученные из сырья предприятий, производящих органическими методами, намного дороже традиционных продуктов питания. Разница колеблется от 30 до 200%, что является огромным барьером для спроса. Это связано с высокой себестоимостью производства и необходимостью сертификации [4].

Прогнозы показывают, что в нашей стране, как и в других странах мира, в ближайшее время будет увеличиваться как спрос, так и предложение на органические продукты питания с учетом динамики развития индустрии эко продуктов. Но проблема может заключаться в плохой организации и координации на рынке, в отсутствии интеграционных связей между переработкой и торговлей, а также хозяйствами, производящими сырье экологическими методами. В России рынок органических продуктов питания формируется очень медленно, а это означает, что как сельхозпроизводители, так и предприниматели из других сегментов агробизнеса тщательно подходят к решению о работе в этой отрасли. С одной стороны, такая ситуация возникает из-за небольшого количества хозяйств, применяющих экологические методы, их большой пространственной разбросанности и связанного с этим небольшого предложения биопродуктов; с другой стороны, из-за небольшого числа получателей и потребителей, заинтересованных в этих продуктах [7].

Кроме того, с рынка поступают сигналы о том, что перерабатывающие предприятия могли бы перерабатывать и продавать больше, если бы не недостаток экологического сырья, ведь органические предприятия в нашей стране составляют небольшой процент от общего объема сельского хозяйства [8]. Многие из сельхозпроизводителей переключились на экологическую деятельность, в основном для получения субсидий, они не производят продукцию на рынок, а только закладывают пастбища и луга. Недостаток сырья может привести к необходимости ввоза его из-за границы в будущем. Описанные условия указывают на необходимость укрепления рынка эко продукции, и одним из способов является реализация идеи кооперации звеньев агробизнеса в этой отрасли через вертикальную интеграцию.

Наиболее часто используемое в теоретических исследованиях определение экономической интеграции означает процесс объединения в одно целое определенных частей, ранее составлявших отдельные элементы, в сфере экономики. Это явление может наблюдаться как в масштабе одной страны (например, интеграция отдельных отраслей или регионов экономики), так и в международном масштабе (интеграция экономик отдельных стран или некоторых из этих экономик). Функционирование АПК как экономически обособленной подсистемы народного хозяйства возможно благодаря интеграционным процессам, происходящим между субъектами, участвующими в производстве продуктов питания.

Интеграция в агробизнесе — это процесс слияния хозяйствующих субъектов, действующих в различных звеньях агробизнеса (вертикальная интеграция, вертикальный захват всех стадий производства и распределения) или действующих в одном звене агробизнеса (интеграция горизонтальная горизонтальная). кооперация компаний, ранее конкурирующих друг с другом, что должно привести к снижению затрат на производство, дистрибуцию и рекламу). Идеальная вертикальная интеграция теоретически существует, когда все звенья взаимодействуют друг с другом. Она возникает, когда компания объединяет различные виды деятельности, связанные с ней, но отличные от тех, которые выполняются в данный момент, последовательно от маркетинга к производству.

В условиях развитой рыночной экономики перерабатывающие предприятия стремятся наладить особо прочные связи с производителем сырья, более прочные, чем это вытекает только из рыночных отношений. Эти тесные связи организационно имеют форму вертикальной интеграции. Таким образом, этот процесс можно определить как одно из проявлений экономической интеграции, свойственное данному уровню развития производительных сил. Он заключается в объединении бизнес-единиц, занимающихся последовательными этапами производства и сбыта

конкретного конечного продукта, в соответствии с интересами промышленного или коммерческого предприятия, выполняющего функцию интегратора.

Примером таких связей может быть супермаркет, который снабжает себя напрямую от производителей продуктов питания. Затем игнорируются другие элементы системы (например, оптовая торговля, посредники). Вертикальная интеграция способна:

- уменьшить жесткость предложения сельскохозяйственной продукции,
- лучше приспособить предложение к изменчивости спроса,
- заменить рассредоточенное предложение компактными регионами специализированного предложения,
- предотвратить перепроизводство сырья - продуктов питания,
- сдерживать рост посреднической маржи, если сельхозпроизводители развивают перспективную вертикальную интеграцию, взяв на себя роль интеграторов,
- снизить себестоимости производства продовольственного сырья за счет специализации производства и постоянного специализированного консультирования.

Следует отметить, что различные тенденции развития органического сельского хозяйства в разных странах определяются национальной сельскохозяйственной политикой и рыночными стратегиями. Поэтому для повышения возможностей развития рынка эко продуктов важно разрабатывать специализированные меры в направлении поддержки органического земледелия и животноводства. 20 августа 2021 года все государства-члены Евразийского экономического союза подписали «дорожную карту» по созданию общего рынка органической продукции. В настоящее время все государства-члены, включая Армению, Беларусь, Казахстан, Кыргызстан и Россию, находятся в процессе реализации своего органического регулирования. Большинство стандартов были разработаны странами индивидуально и имеют некоторые различия. Дорожная карта направлена на то, чтобы начать процесс гармонизации органических стандартов, чтобы обеспечить безбарьерное обращение органических продуктов в пределах Союза. В качестве основного результата дорожной карты к концу 2022 года должен быть разработан набор рекомендаций для государств-членов.

Предложение органических продуктов формируется переработчиками и торговцами, ориентированными на потребителя. Переработчикам и торговым организациям необходимо знать потребности потребителей, чтобы лучше их удовлетворять. Спрос создается конечными потребителями, которые покупают органические продукты для удовлетворения потребностей в продуктах питания, напитках и других целях.

В то же время можно отметить, что потребители не всегда находят нужные им органические продукты в торговых точках. Это можно объяснить тем, что в настоящее время нет связи между производителями, переработчиками и потребителями. Эта ситуация неудовлетворительна для производителей, которые не знают, какие продукты следует выращивать и в каком количестве, а также для переработчиков, которые не могут производить достаточно органических продуктов, и потребителей, которые не могут позволить себе продукт, который они хотят. Развитие структуры рынка остается актуальным вызовом для его развития. Органические продукты в России продаются в специализированных магазинах, супермаркетах, напрямую от сельхозпроизводителей. В некоторых регионах супермаркеты все активнее занимаются распространением органических продуктов. На их долю приходится более 50% всех продаж [10].

Кроме того, производители и переработчики органической продукции распространяют ее как напрямую, так и косвенно, выбирая нескольких посредников. Однако цепочка распространения экологически чистых продуктов питания в России намного короче, чем в европейских странах. Это можно объяснить тем, что производство органических продуктов питания в настоящее время находится на низком уровне. Поскольку распределение органических продуктов питания определяется поведением и мотивацией потребителей, сельхозпроизводители, переработчики и торговые посредники должны учитывать это при поиске точек сбыта органических продуктов. Вполне вероятно, что по мере ускорения темпа жизни потребителю важно найти все необходимое в одном месте, поэтому большинство совершает покупки в супермаркетах. Потребителей к покупке органических продуктов питания в супермаркетах побуждает более широкий ассортимент товаров, удобное географическое расположение.

Чтобы побудить потребителей покупать органические продукты питания, рекомендуется повышать узнаваемость бренда. Если потребитель положительно оценивает марку на основе своего опыта и полученной информации, то, вероятно, он будет искать товар с выбранной маркой как предмет обмена и будет готов платить за товар больше. Для поощрения покупки и потребления органических продуктов питания необходимо формирование потребительского мнения о продуктах, так как мнение является основным критерием принятия решения о покупке.

Подводя итог, можно отметить, что органические продукты пользуются спросом в России, их рынок расширяется и является перспективным. Объем органического производства сельскохозяйственной продукции увеличивается с увеличением количества и площади хозяйств органического производства, но площадь органического производства еще

очень мала, всего 0,3% площади сельскохозяйственных угодий. Важным фактором, ограничивающим спрос на органическую продукцию, является цена органической продукции. Важнейшими мотивами выбора органических продуктов питания являются безопасность продукта, его качество, лучший вкус и защита окружающей среды.

В настоящее время традиционные продукты животного происхождения покупаются и потребляются чаще, чем органические. Вполне вероятно, что потребителям не хватает информации об органических кормах для животных, их свойствах, преимуществах и торговой марке. Существует узкий ассортимент эко продуктов. В статье предложено осуществлять вертикальную интеграцию сельхозпроизводителей, переработчиков и продавцов экопродукции, совершенствовать государственную политику, а сельхозпроизводителям повышать узнаваемость бренда эко продуктов за счет маркетинговых мероприятий и повышения качества продукции.

Библиографический список

1. Рущицкая О. Е., Носкова К. В., Фетисова А. В., Желвис С. А. Рынок экологически чистых продуктов в России. Проблемы и перспективы развития // Московский экономический журнал. 2019. №4. С.43-50.
2. Сандракова И.В., Резниченко И.Ю. Исследование потребителей продуктов здорового питания // Практический маркетинг. 2019. №12 (274). С.22-27.
3. Pekala A. Market analysis of organic foods in the Nordic and Baltic countries. Nordic Council of Ministers. 2020. 140 p.
4. Sivathanu B. Factors affecting consumer preference towards the organic food purchases. Indian Journal of Science and Technology. 2015, Vol. 8 (33), pp. 1-6.
5. Белоусова К.В., Лабазова А.В., Булганина С.В., Лебедева Т.Е. Маркетинговое исследование критериев выбора биопродуктов студентами-спортсменами // Московский экономический журнал. 2020. №5. с/400-408.
6. Сергачев А.А. Эколога-экономический подход к формированию органического агропроизводства // Вестник ОрелГАУ. 2019. №4 (79). С.130-134.
7. Благоев В.И., Шустова Е.П., Мищенко И.В. Сравнительный анализ влияния ключевых факторов на потребительское поведение населения в отношении биопродукции на региональных рынках // Экономика Профессия Бизнес. 2020. №2. С.14-24.
8. Оборин М.С. Модель экологического предпринимательства в аграрной промышленности регионов России // Экономика. Налоги. Право. 2021. №4. С.112-120.
9. Кострова Ю.Б., Шибаршина О.Ю. К вопросу о развитии сертификации органической продукции в РФ // Столыпинский вестник. 2020. №3. С.111-122.
10. FiBL Statistics - European and global organic farming statistics. Data on organic area in worldwide. URL: https://statistics.fibl.org/world/area-world.html?tx_statisticdata_pi1%5Bcontroller%5D=Element2Item&cHash=f367262839ab9ca2e7ac1f333fbb1ca2

11. Мартынушкин А.Б., Мартынушкин П.В. Российский рынок органической продукции: проблемы формирования и пути их решения // Ученые записки Санкт-Петербургского имени В. Б. Бобкова филиала Российской таможенной академии. 2020. №2 (74). С.62-65.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБРАБОТКИ ПОЛЕЙ ГРУППОЙ БПЛА

Н.В. Голобурдин, Р.О. Анисимов, Р.И. Даукаев, В.С. Бакаев

В данной статье рассматривается разработка алгоритма формирования полетных заданий для группы БПЛА для обработки полей различных конфигураций. Проведен анализ существующих решений.

Ключевые слова: БПЛА, группа БПЛА, симулятор, обработка поля.

Введение. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) с каждым годом получают все большее распространение. Технические особенности БПЛА позволяют им выполнять задачи, которые могут быть опасными для пилота классических летательных аппаратов, или задачи, где необходимы быстрые результаты работы со сравнительно невысокой стоимостью полетов [1]. Как правило, для выполнения задачи используются одиночные БПЛА, что ведет к снижению эффективности выполнения задачи на больших пространствах. Применение группы БПЛА позволяет увеличить эффективность, но при этом возникает ряд логистических проблем, таких как: необходимость постоянного мониторинга и обслуживания каждого аппарата в группе в процессе выполнения задачи, планирование траекторий аппаратов таким образом, чтобы минимизировать время выполнения задачи [2].

В данной научной работе рассматривается для формирования полетных заданий для группы БПЛА для обработки поля для минимизации времени выполнения задачи с учетом расхода заряда аккумуляторов БПЛА, расхода жидкости для обработки поля, времени на обслуживание и др.

Модель БПЛА. Для разработки алгоритма была выбрана следующая модель движения робота (рис. 1).

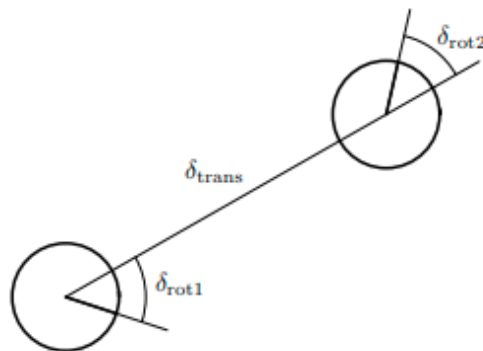


Рис. 1. Модель движения БПЛА

Каждое движение представляется в виде некоторого линейного перемещения и последующего поворота на угол β . При этом в начале и конце линейного перемещения линейная скорость робота равняется нулю. Это позволяет сформулировать удобный и простой алгоритм расчета полетного времени, используя формулы: $S = Vt$ и $V = at$. Для разбиения на последовательности движений используется набор путевых точек. Для генерации одной пары расстояние угол, необходимо учесть следующие 3 целевые точки. Из первых двух рассчитывается расстояние как евклидовое расстояние. Из второй и третьей рассчитывается угол, как арктангенс. При этом дрон имеет следующие характеристики:

- максимальное ускорение, м/с;
- объем бака с орошающей жидкостью, л;
- запас аккумулятора, мин.;
- точность GPS, м;
- ширина орошения на необходимой высоте полета, м.

Преобразование координат поля. Поле для обработки группой БПЛА представлено набором координат в формате WGS84, описывающих точки многоугольника. На первом этапе необходимо осуществить преобразование координат в метрическую систему для упрощения расчетов. Сначала выбирается базовая точка, относительно которой происходит расчет других точек. Для этой точки выбираются метрические координаты (0,0). Для перевода оставшихся точек используется формула нахождения длины дуги окружности:

$$l = r\varphi,$$

где r – радиус земли, в данном случае радиус земли принят 6365446.4253514 метра, φ – соответствующая разница параметров широты и долготы точек [3].

Полученные в результате расчетов координаты передаются в блок алгоритма разбиения на площади.

Алгоритм формирования рабочих зон для БПЛА. Для обработки поля группой БПЛА необходимо разделить поле на участки для обработки каждого участка членом группы. На вход поступает список точек, по порядку описывающих поле в декартовых координатах (рис.2). Происходит поиск крайних точек. Затем находится линия наибольшего размера поля. После этого точки соединяются прямыми и вычисляются уравнения этих прямых. Уравнения записываются в список в виде функций и сохраняются в таком же порядке, как и точки фигуры. Вычисляется угол наклона самой длинного участка поля. Затем происходит деление поля по площадям с помощью интегрирования (рис. 3). Отношения площадей полученных участков задаются коэффициентами k_1, k_2, k_3 .

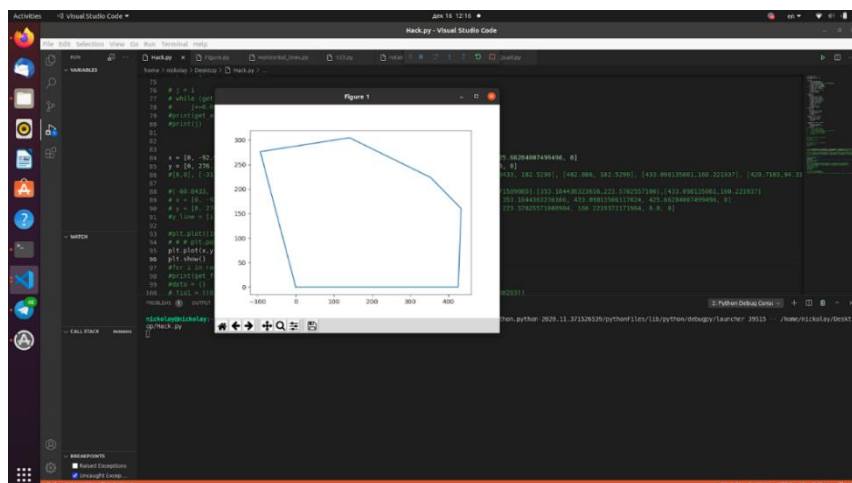


Рис. 2. Вид обрабатываемого поля

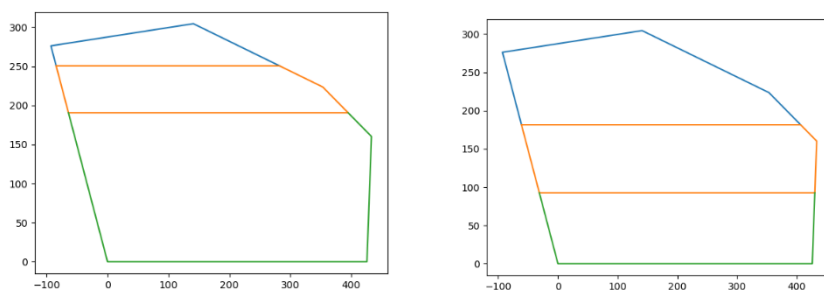


Рис. 3. Разделение поля на участки различной площади

Формирование полетной траектории БПЛА. Полученные точки фигуры, ограничивающие площадь каждого робота (рис. 4), поступают в блок формирования траектории робота.

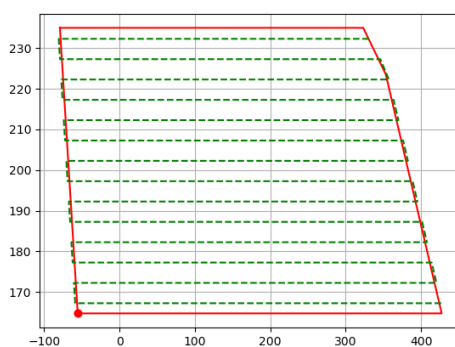


Рис. 4. Облетные дороги на участке поля

Алгоритм работы на данном этапе следующий.

1. Находится наибольшая сторона многоугольника. Для этого находится евклидовое расстояние между соседними точками многоугольника.

2. Из всех точек многоугольника строятся перпендикуляры к наибольшей стороне, среди них выбирается перпендикуляр с наибольшей длиной. Длина данного перпендикуляра необходима для определения количества облетных дорог, которые должен совершить робот.

3. Параллельно наибольшей стороне с шагом равным ширине орошения ТОЧНОСТЬ GPS*2 строятся прямые линии и ищутся их точки пересечения со сторонами многоугольника (линии строятся как вверх, так и вниз). Линии и стороны представляются в виде уравнений прямых вида: $Ax+By+c = 0$, после чего точки пересечения ищутся, используя выражения:

$$x = (c_1*B_2 - B_1*c_2)/(A_2*B_1 - A_1*B_2), \quad (1)$$

$$y = (c_1*A_2 - A_1*c_2)/(B_2*A_1 - B_1*A_2). \quad (2)$$

4. Исходя из точек пересечения отбираются линии, лежащие внутри многоугольника, для этого используется логическое выражение вида

$(x_{пер} > x_{мн1} \text{ и } x_{пер} < x_{мн2})$ или $(x_{пер} < x_{мн1} \text{ и } x_{пер} > x_{мн2})$, здесь $x_{пер}$ – точка пересечения параллельной прямой и прямой многоугольника, $x_{мн}$ – крайние точки прямых многоугольника

5. Теперь необходимо выставить все точки в правильном порядке, так как если пролетать по получившемуся порядку получим следующее: для этого каждая четная и нечетная по номеру прохождения точка, начиная с третьей меняются местами, после чего получаем необходимую траекторию прохода конкретной площади [4].

6. Также для гарантированного полива всей территории и дальнейшего сглаживания траектории необходимо перенести точки за границу поля на расстояние равное погрешности GPS, для этого используется следующий алгоритм масштабирования [5]:

$$\alpha = \text{atan}(y[i] - y[i+1], x[i] - x[i+1]), \quad (3)$$

$$\text{delta}_x = \text{abs}(k*\cos(\alpha)), \quad (4)$$

$$\text{delta}_y = \text{abs}(k*\sin(\alpha)). \quad (5)$$

В зависимости от коэффициента масштабирования можно как раздвинуть траекторию, так и сдвинуть к центру (рис. 5).

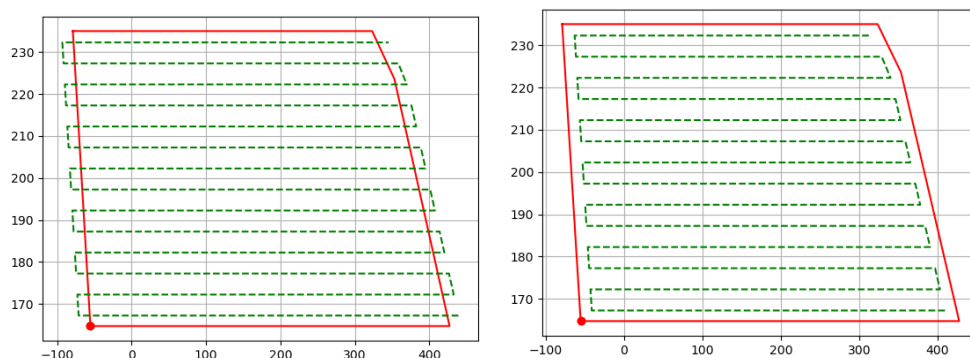


Рис. 5. Демонстрация изменения траектории

Алгоритм оптимизации. Объекты оптимизации: время выполнения задания каждым роботом, количество используемых ресурсов. Подход к оптимизации: итерационный. Алгоритм оптимизации заключается в изменении коэффициентов разбиения полей на площади. В общем виде алгоритм оптимизации можно представить следующим образом (рис. 6) [6].

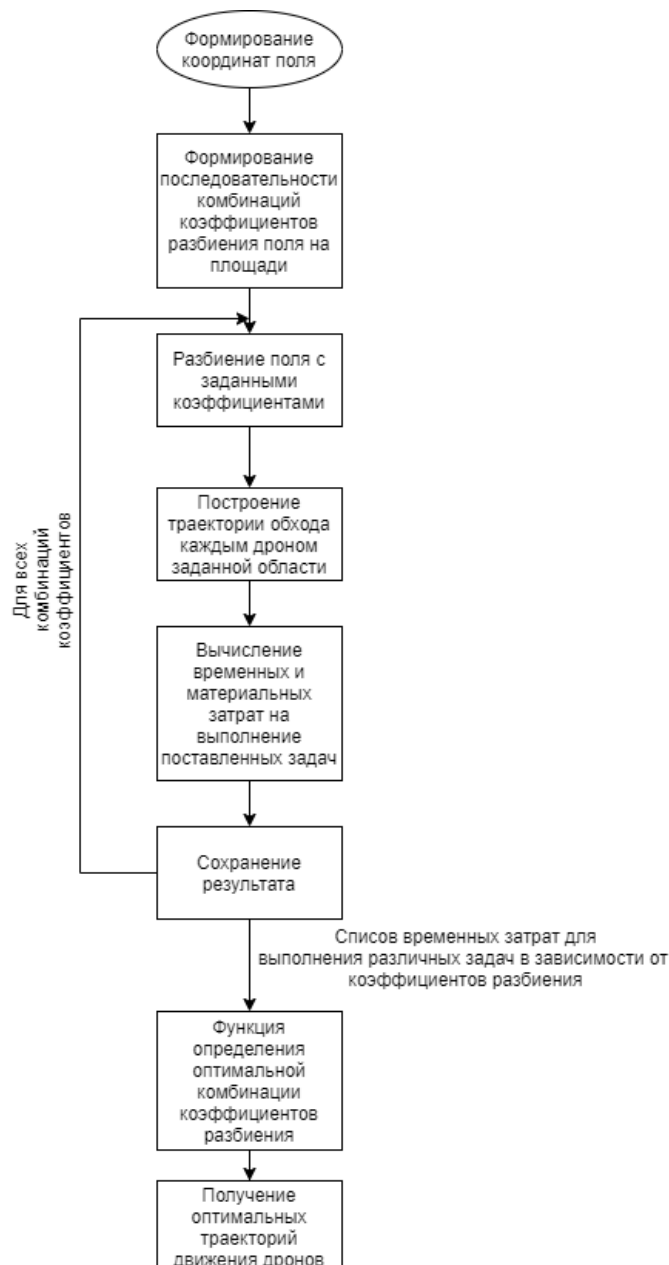


Рис. 6. Алгоритм оптимизации траекторий группы БПЛА

На вход алгоритма оптимизации поступают координаты точек поля. Далее производится формирование последовательности коэффициентов разбиения поля на части с некоторым шагом и условием, что $k_1 + k_2 + k_3 = 1$.

На основе полученной последовательности в цикле производится разбиение поля на участки с заданными коэффициентами. Полученные после разбиения фигуры поступают в блок формирования траектории движения каждого отдельного робота. Полученные траектории движения проходят через симулятор выполнения задания и определяется затраченное время на выполнение поставленных задач при заданном разбиении. Полученное время сохраняется. Алгоритм повторяется для всех комбинаций коэффициентов разбиения. После вычисления всех временных промежутков производится выбор наиболее оптимальной комбинации коэффициентов разбиения. В данном алгоритме наиболее оптимальным считается разбиение, при котором максимально затраченное отдельным дроном на выполнение задачи время будет являться минимальным. После вычисления оптимальной комбинации разбиения поля формируется итоговая траектория для каждого дрона.

Тестирование алгоритма. Тестирование алгоритма производилось в симуляционной среде и на реальных полигонах. Для тестирования были приняты следующие условия:

- дрон запускает один человек;
- поле представляется выпуклым многоугольником;
- перед запуском дрон нужно подготовить, это занимает 5 минут;
- переезд человека по полю в любую точку занимает 5 минут;
- когда орошающая жидкость кончается дрон должен сесть, его перезарядка займет 3 минуты;
- дроны не могут перезаряжаться одновременно;
- дрон не может садиться на поле;
- высота полета 2 м, ширина орошения 3 м.

Было проведено 10 экспериментов в симуляционной среде и реальном полигоне на двух полях. В результате экспериментов было установлено, что использование алгоритма позволяет уменьшить время выполнения задачи в среднем на 52%.

Библиографический список

1. Demyanovich, M.A. Use of unmanned aerial vehicles in criminal intents: Methods of counteraction and fight / M.A. Demyanovich // Law and order: history, theory, practice. –2019. – No. 2 (21), – P. 108–112.
2. Dyachenko, A.A. The task of forming structure in groups of UAVS / A.A. Dyachenko // SFedU news. –2011. – P.22–30.
3. User's handbook on datum transformations involving WGS 84 / 3rd Edition, July 2003 (Last correction August 2008). –2008.– No. 60.
4. Melekhin, V.B. Planning complex fly missions for a group of intelligent unmanned aerial vehicles / V.B. Melekhin, M.V. Khachumov // Scientific and Technical Information Processing. –2020. – Vol. 5. – P. 322–329.

5. Mitrofanov, E.M. Planning a summer mission for an UAV for an Ardupilot type flight controller in a free software review / E.M. Mitrofanov, S.I. Chumachenko, V.Yu. Ivanov // Design Bureau. –2018. – No. 5. – P.54–56.
6. Konnov, I.V. A Simple Adaptive Step-size Choice for Iterative Optimization Methods / I.V. Konnov. – arxiv.org, 2018. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1802.00339>.

ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ЗАДАЧЕ КОРМЛЕНИЯ РЫБ

Р.И. Даукаев, Н.А. Мостаков, Н.В. Голобурдин, Р.О. Анисимов

Целью доклада является описание программно-аппаратной части беспилотного летательного аппарата в задаче кормления рыб. Данный доклад демонстрирует преимущества использования одноплатного компьютера вместе с полетным контроллером в беспилотном летательном аппарате на примере решения задачи кормления рыб.

Ключевые слова: БПЛА, полетный контроллер, одноплатный компьютер.

Введение. В настоящее время беспилотные летательные аппараты (в дальнейшем – БПЛА) используются во всех больших сферах человеческой жизни. Стимулом к развитию беспилотной авиации во всем мире послужила потребность в легких, дешевых летательных аппаратах, обладающих высокими характеристиками маневренности и способных выполнять широкий круг задач. БПЛА успешно применяются как в военных операциях по всему миру, так и в задачах гражданского назначения [1]. В данной работе будет рассмотрена задача кормления рыб с помощью беспилотного летательного аппарата и подробная реализация программно-аппаратной части БПЛА. В качестве самого БПЛА будет взят гексакоптер (т. е. дрон с шестью моторами) (рис. 1).

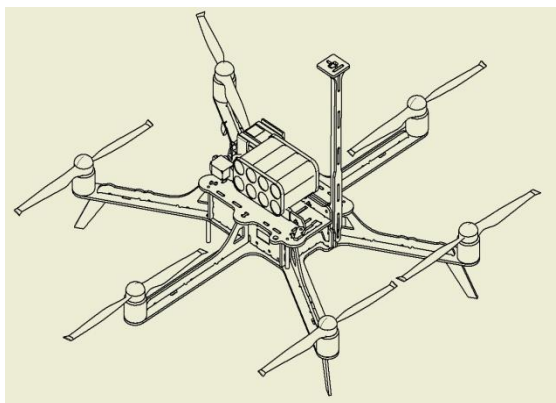


Рис. 1. Дрон, используемый в задаче кормления рыб

Формулировка проблемы. Рассмотрим общую схему строения дрона (рис. 2). В общем случае дрон состоит из аккумулятора, блока навигации (GPS/ГЛОНАСС и компас), регуляторов скоростей вращения, моторов, приемника-передатчика радиосигнала и непосредственно полетного

контроллера. Полетный контроллер – электронное устройство, представляющее из себя вычислительную систему, работающую по сложным алгоритмам, и управляющая полетом беспилотного летательного аппарата.

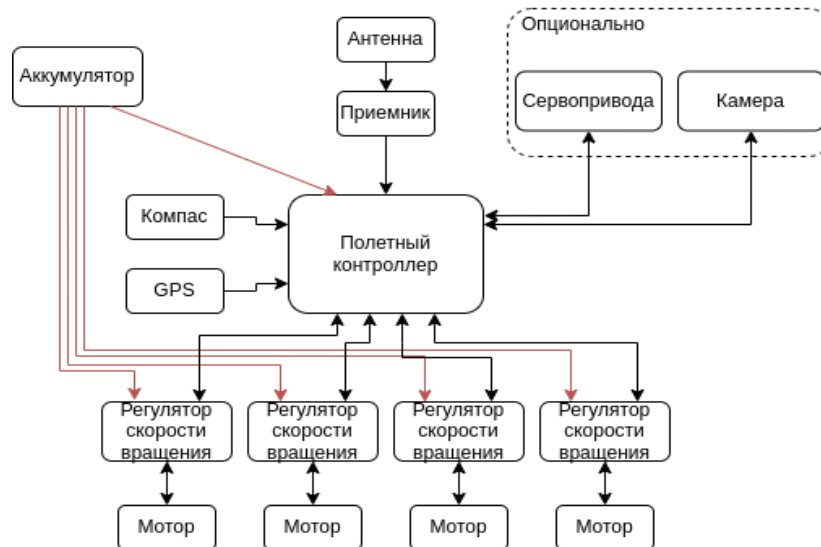


Рис. 2. Общая структурная схема копитера

Перечислим основные задачи, выполняемые полетным контроллером:

- 1) стабилизация аппарата в воздухе;
- 2) сбор и обработка информации с инерциального измерительного блок (IMU), датчиков ускорений и угловой скорости, обеспечивая аэродинамическую устойчивость аппарата в горизонтальной плоскости;
- 3) автоматическое удержание высоты;
- 4) сбор и обработка информации с барометрических или других датчиков, рассчитывающих высоту и обеспечивающих стабилизацию аппарата в вертикальной плоскости. Возможность привязки позиции копитера на заданной высоте и в заданной точке при помощи модулей GPS/ГЛОНАСС;
- 5) автономный полет;
- 6) выполнение заранее построенного маршрута полетного задания созданным в специальном программном обеспечении с постоянным или переменным соблюдением телеметрических данных заданными оператором, и осуществлять автоматический возврат в точку старта при помощи модуля GPS/ГЛОНАСС;
- 7) запись полетных логов.

В течение всего полета контроллер записывает либо во внутреннюю флеш-память, либо в microCD-карту все данные со всех систем в каждый дискретный момент времени (разные данные записываются с разной частотой [2]), такие как: показания GPS; мгновенные скорости дрона; крен, тангаж и рысканье; показания барометров, акселерометров, гироскопов и

прочих датчиков; статус выполнения маршрута и т.д.

После завершения полета всю записанную информацию можно извлечь и проанализировать либо в целях улучшения дальнейшего использования дрона, либо для диагностирования каких-либо неполадок, возникших в процессе полета. Стоит обратить внимание на то, что данные пишутся в реальном времени и им не требуется корректного завершения процесса, т.е. запись логов схожа с «черным ящиком» на борту самолета, поскольку даже в случае падения дрона, если не повреждена microCD-карта, всю информацию можно из нее извлечь.

И именно здесь и кроется первая проблема текущей архитектуры дронов: поскольку microCD-карта находится в слоте на полетном контроллере, то практически всегда ее извлечение подразумевает почти полную разборку дрона. На рис. 3 представлен полетный контроллер Matek-F405SE.

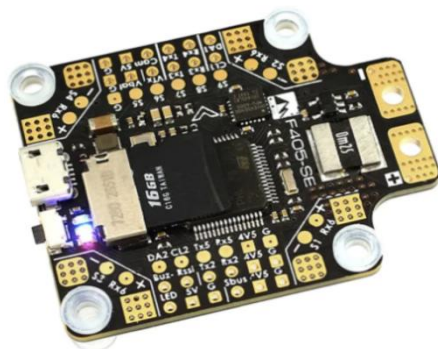


Рис. 3. Matek-F405SE

Как видно из рисунка, разработка конструкции, позволяющей извлекать microCD-карту без предварительной разборки дрона влечет за собой нарушение герметичности. Таким образом, выгрузка полетных логов ставит пользователя перед выбором: либо каждый раз при извлечении логов разбирать и собирать дрон, либо изменять конструкцию с потерей герметичности.

Задача кормления рыб подразумевает регулярные полеты (поскольку подкормка и должна быть регулярной [3]) вне зависимости от погодных условий, и, следовательно, возможные полеты в дождь исключают второй вариант. Но оборудование для кормления рыб может еще более усложнить конструкцию для сборки и разборки, что для пользователя может стать очень проблематичным. Таким образом решением данной проблемы станет интеграция одноплатного компьютера в архитектуру дрона.

Одноплатный компьютер. Рассмотрим структурную схему с одноплатным компьютером (рис. 4). В текущей реализации данной системы одноплатный компьютер общается с полетным контроллером по

последовательному порту, после чего отправляет необходимую информацию по Wi-Fi на наземную станцию управления (GCS).

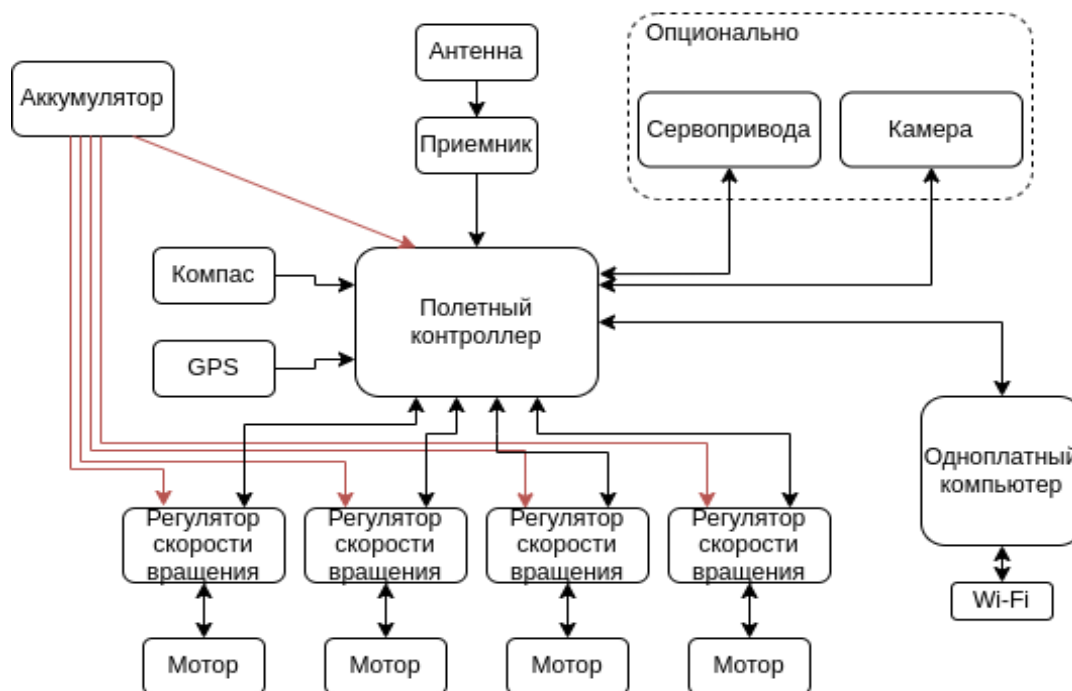


Рис. 4. Структурная схема одноплатного компьютера

Таким образом, от одноплатного компьютера требуется:

- небольшие размеры, ввиду того, что свободного пространства в дроне достаточно мало и он может не поместиться внутрь корпуса;
- наличие отладочного UART-та, иногда бывают ситуации, когда иначе получить доступ к компьютеру не представляется возможным по сетевым протоколам, остается лишь последовательный порт;
- наличие UART-та, основной порт общения между одноплатным компьютером и полетным контроллером. Кроме того, необходима максимально возможная скорость общения, совпадающая на обоих устройствах. Так, на контроллере, используемом в задаче кормления рыб, максимальная скорость последовательного порта составляет полтора миллиона бод;
- наличие встроенного Wi-Fi, недостаток свободного места внутри корпуса дрона усложняет процесс размещения внешних Wi-Fi адаптеров;
- питание от 5V, поскольку именно такой вольтаж может выдать полетный контроллер;
- невысокая цена. Поскольку дрон - устройство относительно недорогое, установка на него дорогого одноплатника станет экономически невыгодной.

Исходя из этих требований был выбран одноплатный компьютер NanoPi Neo Air (рис. 5).



Рис. 5. NanoPi Neo Air

Технические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Процессор	Allwinner H3, Quad-core Cortex-A7 Up to 1.2GHz
Память	512MB DDR3 RAM
Диск	8GB eMMC
WiFi	802.11b/g/n
Bluetooth	4.0 dual mode
MicroUSB	OTG and power input
MicroSD	Slot x 1
Debug Serial Port	4Pin, 2.54mm pitch pin header
GPIO1	2.54mm spacing 24pin, It includes UART, SPI, I2C, GPIO
GPIO2	2.54mm spacing 12pin, It includes USBx2, IR, SPDIF, I2S
Размер платы	40 x 40 mm
Кол-во слоев платы	6
Питание	DC 5V/2A

Интеграция NanoPi Neo Air в архитектуру дрона позволяет разделить систему на классические «верхний» и «нижний» уровни управления, где нижний уровень – это полетный микроконтроллер, а верхний уровень – одноплатный компьютер.

Программное обеспечение. В первую очередь необходимо установить операционную систему. Поскольку NanoPi Neo Air представляет из себя плату ARM-архитектуры с установленным на ней процессором Allwinner

Н3 Quad Core A7 1.2GHz, то ОС должна быть максимально легкая.

Исходя из этого был собран образ на базе Armbian, идеально подходящий под маломощные одноплатники на архитектуре ARM. В образе были сконфигурированы порты под UART (вывод на пины GPIO), настроена максимально возможная скорость общения в один миллион бод.

Структура управления была выбрана следующая: одноплатный компьютер создает сервер, к которому подключается непосредственный пользователь дрона. Пока подключения не произошло, дальнейшая работа производиться не будет. Сервер и клиент общаются между собой по протоколу TCP, поскольку скорость общения в данной задаче не является критически важным параметром, которую может обеспечить протокол UDP, но зато важным параметром является сохранность данных: пользователь должен быть уверены, что данные не теряются и не повреждаются во время работы. Далее, в случае успешного соединения клиента к серверу запускается общение между одноплатным компьютером и полетным контроллером по Serial-порту. Serial-буфер получает данные из TCP-сервера, отправленные клиентом, и посылает их в полетный контроллер. И в обратную сторону: Serial-буфер считывает данные из полетного контроллера, шлет их на TCP-сервер, а тот в свою очередь посылает их клиенту. На рис. 6 представлена структура взаимодействия всех элементов.

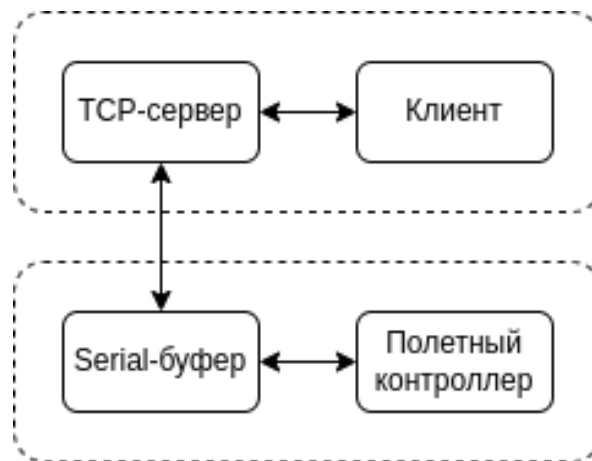


Рис. 6. Структура общения

В качестве языка, на котором реализована вся система, был выбран Python3, в связи с его простотой и легкостью использования. В дальнейшем планируется переписать на язык Rust с целью ускорить выполнение кода.

Также система была поставлена на автозапуск. Для этого средствами операционной системы был реализован так называемый сервис, запускающий bash-скрипт при включении одноплатного компьютера.

Тестирование системы. Тестирование дрона, в который был интегрирован одноплатный компьютер NanoPi Neo Air, проводилось в рамках задачи кормления рыб. Дрон должен был дважды в день на протяжении двух недель сбрасывать корм в пруд при Институте проблем управления РАН (рис. 7). Оператор самостоятельно построил полетное задание и загрузил его в дрон. Система показала себя надежной и корректно работающей, все полеты дрон завершил успешно. Несколько раз оператору потребовались логи полетов, дрон не потребовалось разбирать.



Рис. 7. Сброс корма дроном

Заключение. Представленное программно-аппаратное решение упрощает работу с дроном. Оператор этой системы может обладать меньшей квалификацией относительно оператора дрона без интегрированного в него одноплатного компьютера. Проведенные испытания показали высокую надежность системы, а также простоту использования дрона.

Дальнейшая разработка предполагает переписывание кода с языка Python на язык Rust с целью ускорения всех процессов на одноплатном компьютере, облегчения процесса установки всех необходимых пакетов в операционную систему и непосредственное ее облегчение. Также планируется поднятие на одноплатном компьютере Web-интерфейса с доступом по локальной сети для мониторинга большинства необходимых параметров дрона и возможной загрузки полетного задания в конкретный дрон напрямую из браузера без использования сторонних программ. Также ведутся работы по конфигурации последовательного порта на стороне одноплатного компьютера с целью ускорения выгрузки полетных логов.

Библиографический список

1. Шамаю, Г. Теория дрона / Г. Шамаю. – Ad Marginem Press, 2020. 280 с.
2. ArduPilot [программный пакет с открытым исходным кодом] / разработчик: ArduPilot. –2021. – URL: <https://ardupilot.org/copter/docs/common-logs.html> (дата обращения 10.09.2022).
3. Раупова, М.Я. Корм и кормление рыб / М.Я. Раупова, Л.Х. Алимova // Наука, образование и культура. – 2019. – № 2 (36). – С.11–12.

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

С.А.К. Диане, А.Ю. Исхаков, А.О. Исхакова

Рассмотрена задача обхода целевых точек на местности группой гетерогенных мобильных роботов. Предложен алгоритм, основанный на эволюционном подходе, для поиска групповых маршрутов, удовлетворяющих ряду условий. В числе учитываемых критериев – минимизация суммарного пути роботов-связистов и роботов-исполнителей, а также поддержание беспроводной сетевой связи. Исследовано влияние значимости критериев на форму траекторий обхода целевых точек.

Ключевые слова: группа роботов, планирование маршрутов, поддержание связи, эволюционный метод.

Мультиагентные робототехнические системы (МАРС) активно разрабатываются и широко исследуются в отечественной и мировой научной среде [1]. Существующие исследования направлены на увеличение эффективности мобильных робототехнических группировок, агенты которых способны взаимодействовать друг с другом при выполнении сложных миссий, в том числе при решении исследовательских, разведывательных, а также тактических боевых задач. Так, в работах [2, 3] полагается, что создание смешанных группировок, включающих в свой состав роботов, функционирующих в различных средах (в воздушном, наземном, надводном и подводном пространстве), позволит значительно повысить эффективность выполнения поставленных задач.

В то же время гетерогенность МАРС может проявляться и на уровне отдельных группировок роботов, действующих в пределах общей среды. Разделение роботов на различные категории может проводиться путем сравнения их функциональных возможностей. Так, для задач разведки местности целесообразным является выделение подмножества роботов-разведчиков и роботов-связистов.

Характерной особенностью в разработке подобных систем является наличие большого количества факторов неопределенности и ограничений, относящихся как к внешней среде, так и к параметрам робототехнической группировки. В числе ограничений, влияющих на процесс планирования движений, следует отметить ограниченность зоны действия приемопередающих устройств, устанавливаемых на борту мобильных роботов.

В рамках решаемой задачи планировалось обеспечить планирование групповых траекторий гетерогенной МАРС с условием поддержания непрерывной связи в процессе движения робототехнических агентов.

Формализованную постановку рассматриваемой задачи можно представить в следующем виде. Для группы роботов $R=\{r_1, \dots, r_N\}$, расположенных в координатах $P_0=\{p_{0r_1}, \dots, p_{0r_N}\}$ определить маршруты движения $T=\{t_1, \dots, t_N\}$, реализующие обход целевых точек местности $P=\{p_1, \dots, p_M\}$ и обеспечивающих максимизацию функционала $F(t_1, \dots, t_N)$.

В общем случае функционал F должен учитывать требование минимизации суммарной длины пути, проходимого роботами, соблюдение условий непрерывности групповой беспроводной сетевой связи, а также обеспечение сокрытия управляющих сигналов. Иными словами, отбору подлежат те групповые решения, которые приводят к скорейшему выполнению поставленной задачи с минимальной ретрансляцией радиосигналов между роботами.

Следует также отметить, что в ряде прикладных задач функционал пригодности может учитывать и безопасность маршрутов в плане уклонения от расположенных на местности препятствий.

Особенностью исследуемой задачи является гетерогенность робототехнической группировки, выраженная тем фактом, что некоторые мобильные роботы выступают исключительно в роли агентов исполнителей, а некоторые роботы совмещают выполнение задач по обходу целевых точек с функцией ретрансляции сообщений в динамически конфигурируемой беспроводной информационной сети.

Так на рис. 1. представлено множество целевых точек, подлежащих осмотру группой мобильных роботов. Роботы в позициях 1 и 3 выступают в роли исполнителей. Робот в позиции 2 выступает одновременно в роли исполнителя и ретранслятора радиосигнала.

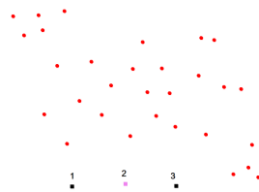


Рис. 1. Пример мультиагентной задачи коммивояжера для гетерогенной робототехнической группировки

Решение данной задачи возможно с привлечением комбинаторных методов и сводится к поиску множества маршрутов, удовлетворяющих некоторому обобщенному критерию, задаваемому экспертом.

В частности, на рис. 2 представлен вариант планирования маршрутов для данных трех роботов, а также динамика их перемещения на небольшом отрезке времени.

Изначально все роботы попадают в зону действия приемо-передающих устройств смежных агентов (рис. 2,а). Но после небольшого перемещения

роботы 1 и 2 удаляются друг от друга на расстояние превышающее радиус связи R , что приводит к изменению матриц достижимости и связности мультиагентной робототехнической системы (рис. 2, б).

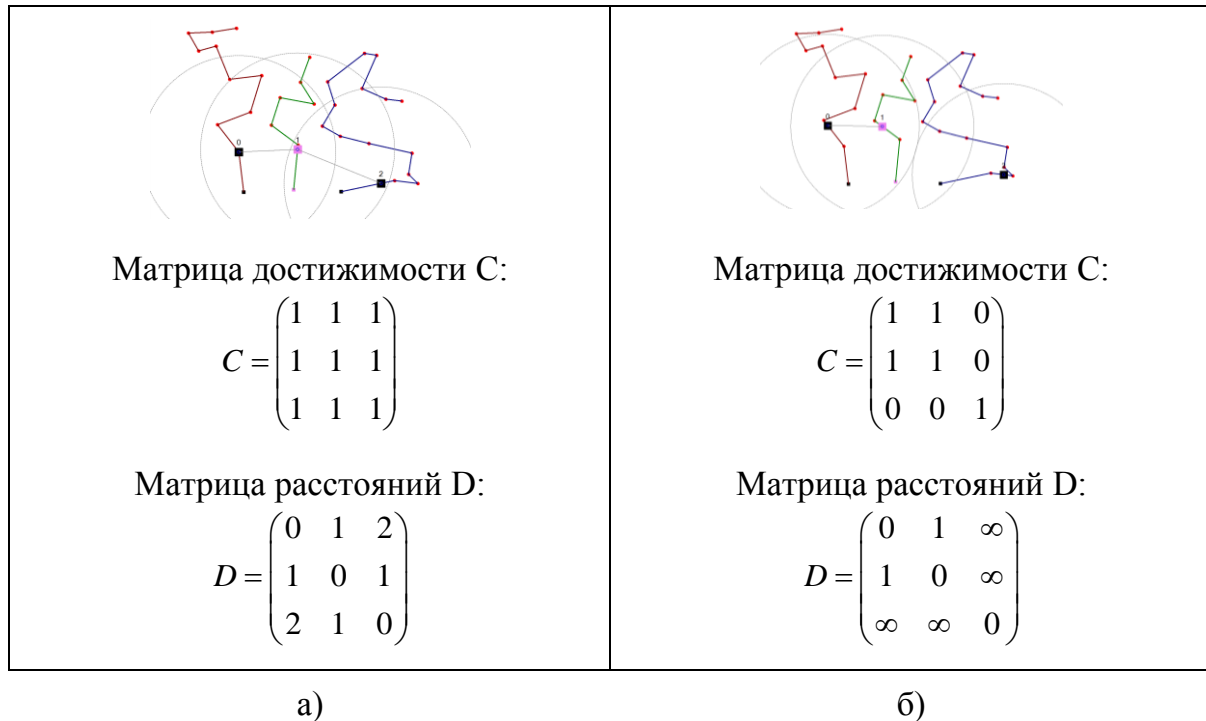


Рис. 2. Оценка непрерывности групповой беспроводной сетевой связи в процессе движения трех мобильных роботов по выбранным маршрутам:

- а) ситуация связности информационной сети;
- б) ситуация разрыва связности информационной сети

Матрица достижимости $C(i,j)$ ориентированного графа G хранит информацию о существовании путей между его вершинами и позволяет оценить непрерывность групповой беспроводной сетевой связи.

Матрица расстояний $D(i,j)$ ориентированного графа G хранит информацию о длине путей между его вершинами. Причем при определении степени сокрытия передаваемых сигналов важна оценка расстояния не в метрическом пространстве, а в терминах количества ретрансляций между агентами сети.

Отметим, что при разрыве связи степень сокрытия передачи разнородной сенсорной и командной информации повышается ввиду приостановки информационного обмена между некоторыми из роботов.

Формула расчета оценки непрерывности передачи информации по матрице достижимости:

$$F_1(t) = \frac{\sum_{i,j} C(i,j)}{n \cdot m}, \quad (1)$$

Формула расчета степени сокрытия передаваемой информации по матрице расстояний:

$$F_2(t) = \frac{1}{1 + \sum_{i,j:D(i,j)<\infty} D(i,j)}, \quad (2)$$

Наряду с сетевыми аспектами организации управления группой роботов сложность решения поставленной задачи обхода целевых точек определяется также с учетом общего расстояния, проходимого роботами:

$$F_3 = \frac{L^*}{\sum_{i=1}^N (a_i + \sum_{j=1}^{M_i} l_j)}, \quad (3)$$

где a_i – расстояние от i -го агента до первой точки соответствующей траектории, N – количество роботов, M_i – число точек маршрута робота i , l_j – длина j -го отрезка маршрута, L^* – характеристическая длина маршрута.

Величина L^* определяется по формуле:

$$L^* = N \cdot \max_i |p_i - c_i|, \quad (4)$$

где p_i – точка из объединенного множества целей и начальных координат роботов P , c_i – геометрический центр множества P .

Многокритериальность оценки процесса исследования местности группой роботов с учетом пространственных и информационных ограничений приводит к выбору функции пригодности в виде взвешенной суммы трех слагаемых:

$$F = k_1 \sum_{t=1}^T F_1(t) + k_2 \sum_{t=1}^T F_2(t) + k_3 F_3, \quad (5)$$

где T – число временных интервалов при имитационном моделировании процесса движения мобильных роботов.

Решение описанной выше оптимизационной задачи по поиску маршрутов, максимизирующих функционал F , можно выполнить с привлечением методов эволюционного программирования [4–6].

В рамках эволюционного подхода задача формализуется таким образом, чтобы ее решение могло быть закодировано в виде вектора генов, где каждый ген может быть битом, числом или неким другим объектом. В классических реализациях генетического алгоритма предполагается, что генотип имеет фиксированную длину. Однако существуют вариации генетического алгоритма, свободные от этого ограничения. Некоторым, обычно случайным, образом создается множество генотипов начальной популяции. Они оцениваются с использованием функции приспособленности, в результате с каждым генотипом ассоциируется определенное значение, которое определяет насколько хорошо фенотип, им описываемый, решает поставленную задачу. Из полученного множества решений с учетом значения приспособленности выбираются решения (обычно лучшие особи имеют большую вероятность быть

выбранными), к которым применяются генетические операторы (в большинстве случаев скрещивание и\или мутация), результатом чего является получение новых решений. Для них также вычисляется значение приспособленности, и затем производится отбор лучших решений в следующее поколение. Этот набор действий повторяется итеративно, так моделируется эволюционный процесс, продолжающийся на протяжении нескольких поколений, пока не будет выполнен критерий остановки алгоритма.

В процессе поиска опорных траекторий мобильные роботы рассматриваются как материальные точки. Особью эволюционного алгоритма в данном случае является множество траекторий, для каждого из агентов, входящих в состав МАРС. Мутация осуществляется как случайная перестановка порядковых номеров опорных точек в траекториях некоторых агентов

Скрещивание осуществляется как обмен случайными участками траекторий между разными решениями-особями эволюционного алгоритма.

Оценка пригодности особей в популяции генетического алгоритма учитывает суммарную длину пути, проходимого роботами, условия непрерывности и скрытности радиосвязи.

Предложенные модели и алгоритмы были реализованы в рамках программного комплекса “Multiagent TSP” для решения задач группового планирования маршрутов движения мобильных роботов (рис. 3).

Функционал программного комплекса включает: задание роботов и целевых точек на рабочем пространстве; сохранение и загрузку сформированных сцен; инициализацию генетического алгоритма с требуемыми параметрами; пошаговое выполнение процедуры эволюционного поиска; отображение графика функции пригодности наилучшего решения; отображение значений критериев F_1, F_2, F_3 .

Цель экспериментальных исследований состояла в проверке гипотезы о влиянии весовых коэффициентов $K = \{k_1, k_2, k_3\}$ в формуле (5) на характеристики групповых маршрутов, формируемых генетическим алгоритмом.

Выбранный размер популяции генетического алгоритма – 1000 особей, длительность поиска решений – 500 итераций.

На рис. 3–4 представлены результаты планирования групповых маршрутов при различной степени влияния коэффициента, отвечающего за непрерывность информационного обмена.

В табл. 1 представлены результаты эволюционного поиска маршрутов. Анализируя табл. 1, можно заключить, что предложенные алгоритмы достаточно хорошо справляются с поставленной задачей. Так при достаточно большом значении весового коэффициента k_1 , отвечающего за

непрерывность информационного обмена, удается удержать максимальное удаление роботов от ретранслятора в пределах радиуса связи $R \leq R_{max}$.

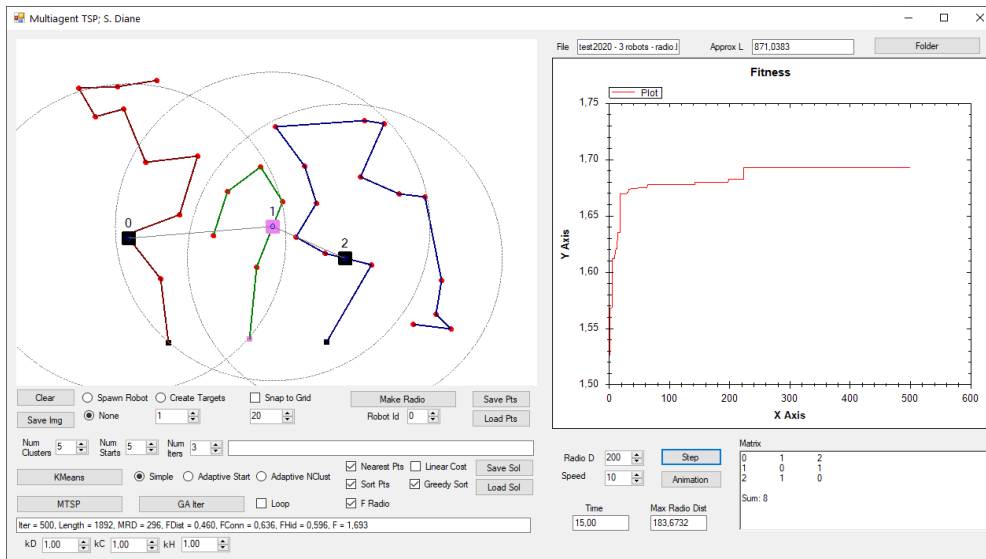


Рис. 3. Фрагмент моделирования передвижения мобильных роботов согласно найденным маршрутам при $k_1=1, k_2=1, k_3=1$

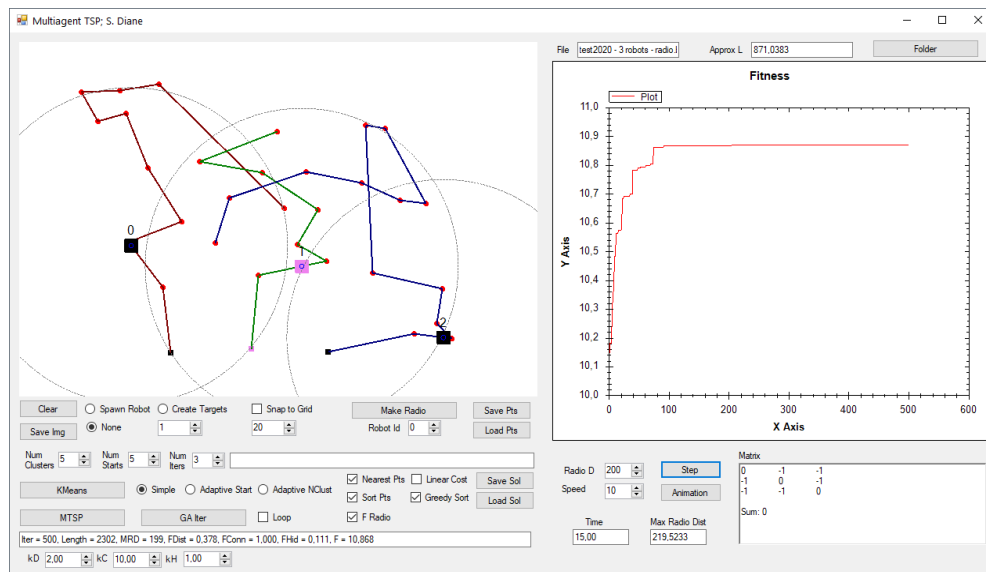


Рис. 4. Фрагмент моделирования передвижения мобильных роботов согласно найденным маршрутам при $k_1=2, k_2=10, k_3=1$

Таблица 1

Результаты эволюционного поиска маршрутов для группы роботов

№	k_1	k_2	k_3	Радиус связи R_{max}	Суммарная длина маршрута L_{sum}	Оценка связности F_1	Оценка скрытности F_2	Макс. удаленность от ретрансл. R
1	1	1	1	200	1892	0,600	0,596	296
2	5	1	2	200	2012	0,970	0,126	253

№	k_1	k_2	k_3	Радиус связи R_{\max}	Суммарная длина маршрута L_{sum}	Оценка связности F_1	Оценка скрытности F_2	Макс. удаленность от ретрансл. R
3	10	1	2	200	2302	1,000	0,111	199

Заключение. Таким образом, в рамках проведенного исследования был разработан комплекс программных средств, обеспечивающих планирование траекторий роботов в составе гетерогенной МАРС с учетом поддержания сетевой связи и обеспечения условий для сокрытия управляющих сигналов в процессе интеллектуального взаимодействия группы робототехнических агентов.

Дальнейшие направления развития представленных алгоритмических и программных средств связаны с модификацией целевого функционала для организации планирования безопасных маршрутов на местности с препятствиями, а также с учетом неполноты картографической информации о расположении препятствий и целевых объектов

Библиографический список

12. Макаров, И.М. Мультиагентные робототехнические системы: примеры и перспективы применения / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов, Е.Н. Крючков, Р.В. Кучерский, С.А.К. Диане // Мехатроника, автоматизация, управление.– 2012. – №2. – С. 22–32.

13. Iskhakova, A. Method of verification of robotic group agents in the conditions of communication facility suppression / A. Iskhakova, A. Iskhakov, R. Meshcheryakov, E. Jharko // IFAC PapersOnLine. – 2019. – Vol. 52, No. 13. – P. 1397–1402.

14. Мещеряков, Р.В. О проблемах анализа данных в системах управления инцидентами безопасности роботов / Р.В. Мещеряков, С.Ю. Исхаков // Информационные технологии и системы. Труды Восьмой Всероссийской научной конференции с международным участием. – Ханты-Мансийск: АУ «Югорский НИИ информационных технологий», 2020. – С. 108–114.

15. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И. Д. Рудинского / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия - Телеком, 2006. – 452 с.

16. Varga, A. A Multi-agent Approach To Solving Dynamic Traveling Salesman Problem / A. Varga, C. Chira, D. Dumitrescu // AIP Conference Proceedings. – 2009. – Vol. 1117, No. 189.

17. Kent, T.E. Decentralised Multi-Demic Evolutionary Approach to the Dynamic Multi-Agent Travelling Salesman Problem / T.E. Kent, A.G. Richards // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion, GECCO '19. – New York: Association for Computing Machinery (ACM), 2019. – P. 147–148.

УМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Е.С. Дуванов, Е.М. Захарова, А.Ф. Пащенко, Л.Д. Хижинская

Аннотация: Рассматриваются вопросы создания интеллектуальных железнодорожных транспортных систем (умных). Рассмотрены вопросы моделирования с использованием методов искусственного интеллекта для решения задач моделирования и управления транспортными потоками и пассажироперевозками с целью повышения эффективности пассажиропотоков в городских агломерациях.

Ключевые слова: умный транспорт, нечеткие модели, моделирование прогнозирования пассажиропотоков.

Введение. Умный транспорт – общее название всех видов транспортных средств, использующих современные технологии связи для эффективного перемещения людей, мониторинга местоположения, взаимодействия между транспортными средствами и другими элементами дорожного движения, повышения экологичности транспорта и безопасности использования дорог в целом. С увеличением количества транспорта, находящегося на дорогах, возникают проблемы перегруженности и нерационального использования дорожных ресурсов, которые влекут за собой увеличение времени в пути, количества потребляемого топлива, и выбросов, загрязняющих окружающую среду.

Основным направлением создания систем умного транспорта является создание интеллектуальных автоматизированных систем управления способных не только находить оптимальные решения для возникающих дорожных ситуаций, но и проводить анализ для выявления “узких” мест технологических процессов на дорогах.

Искусственный интеллект для умного транспорта. Тенденции внедрения современных технологий в сферу управления движением поездов продиктованы изменениями в принципах реализации ответственных технологических процессов, направленными не просто на совершенствование всех компонентов железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава, но и на получение максимального эффекта для всех участников перевозочного процесса.

Наиболее актуальными направлениями развития умного транспорта являются активная цифровизация архивных данных движения, а также использование больших данных и искусственного интеллекта. Разрабатываются все больше интеллектуальных систем, обеспечивающие автоматизацию и поддержку принятия решений на всех этапах организации транспортных перевозок. Одно из главных преимуществ

цифровизации – это возможность интеграции отдельных компонентов в единое целое для комплексного управления всем перевозочным процессом.

В современных условиях основным способом повышения эффективности производства и управления является усовершенствование существующих методов управления или внедрение новых технологий. Железнодорожный транспорт является одной из тех отраслей, где подобная задача является наиболее актуальной. Во многих технологических процессах в данной области первый этап автоматизации уже практически завершен [1]. Большая часть информационно-управляющих систем выполняет лишь функцию поддержки принятия решений, а конечное решение по-прежнему принимаются человеком. Во многих случаях на это есть особые причины. Например, ни одна современная управляющая система не удовлетворяет достаточной степени надежности для поручения ей автоматического решения таких задач, так как ошибки в них могут создать угрозу здоровью или жизни человека.

В работах [2, 3] выделяются наиболее актуальные задачи информатизации на транспорте такие, как: автоматизация основных функций управления; применение современных средств анализа и обработки информации для поиска решений; переход на ремонтно-восстановительные методы обслуживания; разработка экспертных систем, способных находить решения и формировать список действий диспетчеров в нештатных ситуациях. Большинство технологических задач, решаемых на железнодорожном транспорте, достаточно сложны, и их полная формализация практически невозможна. Автоматизировать подобные процессы, используя только стандартные аналитические методы и линейные алгоритмы, практически невозможно. Поэтому возникла необходимость в разработке и применении новых методов, способных решать данные задачи. Такими подходами, например, являются методы ИИ и экспертные системы [1, 4].

Практические методы решения задач в области умного транспорта. Повышение экономической эффективности работы любой транспортной системы невозможно без решения задачи автоматизации планирования расписания поездов и управления содержанием тягового хозяйства. Для обеспечения корректной работы перевозочного процесса требуется создать соответствующие условия по содержанию эксплуатационного парка, гарантирующие его снабжение требуемым количеством тяговых ресурсов в поставленные сроки. В свою очередь при планировании содержания тяговых ресурсов важным условием является поведение транспортных потоков, влияющих на моделируемую систему. Эти три задачи взаимосвязаны и лежат в основе создания современных интеллектуальных систем умного транспорта. Рассмотрим предложенные методы их решения.

Задача прогнозирования транспортного потока. Моделированию поведения транспортного потока посвящено много работ. Для этого используются регрессионные модели, вероятностные методы и модели. Существующие методы не всегда являются эффективными по причине недостатка адекватных моделей в данной области и увеличения количества потока людей с открытием все новых и новых станций на уже существующих путях. Поэтому возникает необходимость прогнозирования потока пассажиров для оптимизации уже существующих или планируемых систем путей сообщения. В качестве альтернативы для моделирования и прогнозирования таких потоков можно использовать методы из области искусственного интеллекта. Их можно рассматривать как более гибкие и подходящие для решения вопросов в условиях большой неопределенности, в сравнении с обычными детерминированными и статистическими подходами. Сочетание различных методов искусственного интеллекта и методов оптимизации приводят к более эффективному решению и придает большую гибкость при работе в реальной ситуации.

Определим параметры потока, которые необходимо прогнозировать для описания его поведения. Если рассматривать транспортный поток как несжимаемую жидкость, то основными макропараметрами будут:

- поток (общее количество людей в поезде в единицу времени);
- плотность (количество людей, находящихся на единичном отрезке поезда).

Исходя из этого, плотность потока пассажиров будет выходным параметром для нашей модели. Требуется построить прогноз для плотности потока пассажиров на заданный период времени. Плотность потока $N(t)$ – количество пассажиров в поезде в текущий момент времени t на единицу площади. На основе этих результатов оптимизируется необходимое в текущий интервал времени количество тяговых ресурсов.

Большинство систем управления современными технологическими процессами строятся с использованием математического моделирования и прогнозирования. Многие технологические процессы и системы имеют важные особенности: сложность, нелинейность, слабая изученность связей внутри системы, высокая инерционность, наличие запаздывания и помех, нестационарность и т.п. Эти условия неопределенности приводят к тому, что стандартный детерминированный подход к моделированию может стать неприемлемым. Один из подходов решения этой проблемы является привлечение качественной информации [5]. Поскольку современные сложные и плохо формализуемые транспортные системы функционируют в условиях неопределенностей для построения правил выводов системы принятия решений наряду с аналитическими алгоритмами будем использовать нечеткую логику и нейронные сети. В данной работе для моделирования процессов перевозок используется нечеткая разностная

модель TSK-модель, построенная на базе статистической нечеткой модели Такаги (Takagi) и Суджено (Sugeno), именуемой TS-моделью [6]:

$$R^\theta: \text{if } v_1(t) \text{ is } V_1^\theta(t), \dots, v_{m+l+1}(t) \text{ is } V_{l+m+1}^\theta(t), \\ \text{then } N^\theta(t) = \sum_{j=1}^{m+l+1} w_j^\theta v_j(t), \theta = \underline{1, n}, \quad (1)$$

где V_k^θ – нечеткие множества, характеризующиеся функциями принадлежности $V_k^\theta(v_k, d_k^\theta)$.

Указанные модели позволяют применить методы параметрической идентификации; модели позволяют с высокой точностью описывать нелинейные динамические процессы; усредняющие свойства механизма вывода, а специфический вид функций принадлежности обеспечивает высокую помехоустойчивость модели [7].

В блоке фазификации значения переменных $v_1(t), v_2(t), \dots, v_{m+l+1}(t)$ преобразуются в матрицу

$$V = [V_1^1(v_1(t)) \dots V_{m+l+1}^1(t) \dots V_1^n(t) \dots V_{m+l+1}^n(t)]. \quad (2)$$

В блоке нечеткого вывода вычисляется величина истинности θ -ого правила по формуле

$$\beta^\theta(t) = V_1^\theta(v_1(t)) \oplus V_2^\theta(v_2(t)) \oplus \dots \oplus V_{L+m+1}^\theta(v_{L+m+1}(t)), \quad (3)$$

откуда определяется нечеткая функция полезности

$$u^\theta = \frac{\beta^\theta(t)}{(\beta^1(t) + \beta^2(t) \dots + \beta^n(t))}, \theta = 1, \dots, n.$$

(4)

В блоке дефазификации определяется конкретное значение выхода $\hat{N}(t)$ по формуле (1).

Решение задачи прогнозирования транспортного потока. Будем использовать гибридный подход идентификации модели транспортного потока: сочетающий структурную и параметрическую идентификацию [8, 9]. Структурная идентификация – определение количества правил и порядка нечеткой модели. Параметрическая идентификация – определение коэффициентов линейных разностных уравнений, а также параметров функций принадлежности. В качестве алгоритма параметрической идентификации используется метод стохастической аппроксимации.

Исходные данные для алгоритма: количество правил n , порядок r , s нечеткой модели, значение векторов коэффициентов c и параметры функций принадлежности. Критерием остановки алгоритма является средне-модульная ошибка:

$$J(c) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{|N(t) - \hat{N}(t)|}{N(t)}. \quad (5)$$

Работа всего гибридного алгоритма завершается, когда $J < 0.03$. На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма идентификации динамической нечеткой модели.

Имитационное моделирование пассажиропотока. В качестве входных данных возьмем следующие факты:

- время для прогнозирования - t ;
- плотность потока в момент $t-1$;
- плотность потока в момент $t-2$;
- максимальное количество стоячих и сидячих мест.

Для каждого из этих фактов рассчитываются функции принадлежности, и набор нечетких правил. Прогнозирование максимальной плотности пассажиропотока по всему временному отрезку движения выбранного поезда позволяет решить задачи оптимального планирования перевозок в данный временной отрезок, а также определить необходимое количество тяговых ресурсов и вагонов для обеспечения перевозочного процесса. Если эта плотность пассажиропотока будет высокой, то можно увеличить общий объем пассажироперевозок для текущего отрезка времени или, увеличивая количество вагонов, можно уменьшить плотность пассажиров в одном вагоне. Если же плотность будет относительно малой, то объем перевозок можно уменьшить для оптимизации использования железнодорожных ресурсов и финансов.

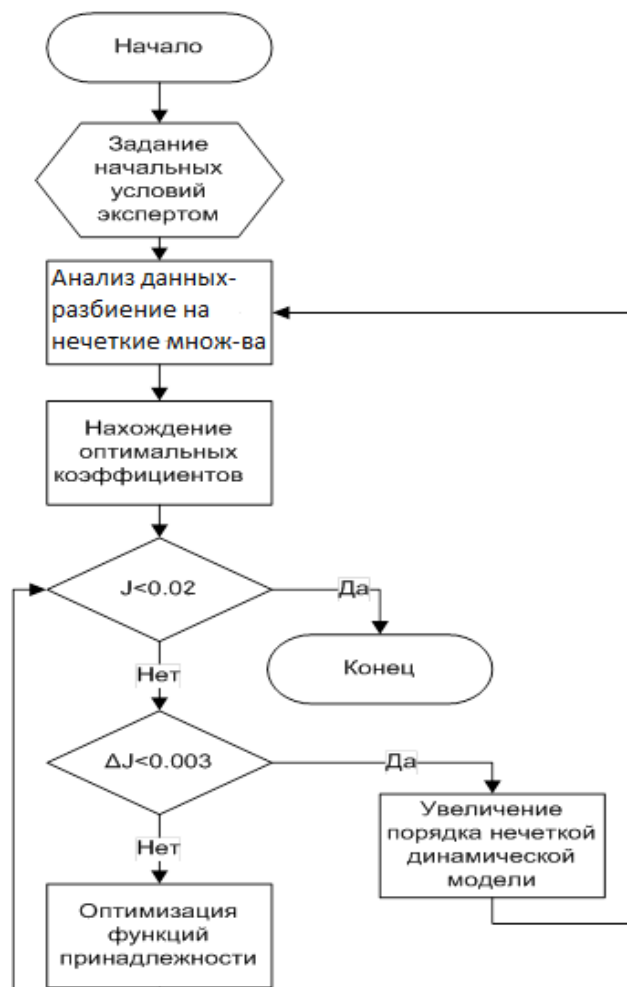


Рис. 1. Блок-схема алгоритма идентификации динамической нечеткой модели

Эта модель позволяет расширить список решаемых задач. Можно обучить систему так, чтобы для прогнозирования плотности пассажиропотока учитывались не только временные отрезки суток, но и дни недели, а также различные сезоны. Это применимо в условиях изменения потока в зависимости от дня недели и периода года. Например, в дачный сезон количество людей, едущих из города в область на выходные, резко увеличивается. Поэтому стоит пускать более длинные поезда в пятницу вечером из города и в воскресенье вечером в город.

Предложенная модель дает возможность описания поведения транспортных потоков с достаточной точностью с помощью интеллектуальных систем. Это преимущество можно применять для решения задачи маршрутизации транспортной сети. Особенно в том случае, когда транспортная обстановка резко меняется и нужно находить оптимальный маршрут по каким-то параметрам, учитывая, что какие-то элементы транспортной сети могут стать недоступными.

Моделирование пассажиропотока для регулирования интервала движения и количества поездов метрополитена

Планирование графика движения общественных транспортных средств и обеспечение перевозочного процесса необходимыми ресурсами является основной задачей любой транспортной системы, в частности метрополитена. Данный процесс всегда связан с учетом большого количества факторов, а успешное движение по графику обеспечивается верной организацией и точным выполнением технологического процесса работы станций, депо, тяговых подстанций, пунктов технического обслуживания и других подразделений. Необходимо обеспечивать потребность в перевозке пассажиров, безопасность движения, эффективное использование пропускной и провозной способности участков и перерабатывающей способности станций, рациональное использование подвижного состава. Основные мировые тенденции развития рельсовых транспортных систем предполагают увеличение автоматизации перевозочного процесса. Возникает необходимость рассчитать необходимое количество поездов и время их отправления из депо, при котором весь пассажиропоток будет перевозиться по заданному участку пути.

Рассмотренный выше метод прогнозирования пассажиропотока позволяет решить вопрос о том, какому количеству поездов и в какое время нужно выехать из депо, чтобы охватить весь пассажиропоток, учитывая его интенсивность и неравномерность. Реализацию функции управления транспортной системой можно осуществлять программно-аппаратным комплексом, функции которого направлены на управление движением поездов, причем преимущественно в автоматическом режиме в соответствии с задаваемыми режимами эксплуатации. Автоматическая

эксплуатация - это нормальный режим работы. Система самостоятельно координирует, посредством графика, процессы движения и отправления на станциях, выдачу и отправку подвижного состава из депо. График движения изменяется автоматически с учетом заданной парности и пассажиропотока на линии.

Процесс осуществления перевозок с помощью изменения интервала графика движения на линии должен обеспечиваться оптимизацией провозной способности системы. Изменение интервала должно осуществляться системой в автоматическом режиме эксплуатации в соответствии с установленным графиком движения и в полуавтоматическом режиме действиями диспетчера. Поездной диспетчер должен иметь возможность оптимизировать провозную способность в соответствии с реальным пассажиропотоком путем изменения графика движения, а также выдавать команды, переключающие отдельные компоненты подсистем в такие рабочие состояния, которые обеспечивают их реализацию на уровне регулирования.

Таким образом, диспетчер сможет в особых ситуациях независимо от введенного графика движения подавать команды, например, на открытие или закрытие дверей находящегося на остановочном пункте подвижного состава, передавать пассажирам необходимую информацию с помощью текста на табло и голосовых сообщений, выполнять маневровые операции и мероприятия по устранению неисправностей. Централизованное вмешательство диспетчера будет закономерно лишь в тех случаях, когда он получил информацию о нештатной ситуации на линии и, в особенности, о наличии неисправности.

Заключение. Умный транспорт – одно из основных направлений умного города, отвечающего за перемещение людей, оптимизацию взаимодействия между транспортными средствами и эффективное использование и изменение транспортной инфраструктуры. Задачи, возникающие в данной сфере, отличаются сложностью их формализации и решения, зачастую связанные с повышенными требованиями к безопасности. Для их решения главным трендом на сегодняшний день является разработка интеллектуальных автоматизированных систем управления, способных не только находить оптимальные решения для возникающих нештатных ситуаций, но и обеспечивающих проведение анализа для преждевременного выявления «узких» мест в технологических процессах управления и на дорогах.

Предложенная автоматизированная система моделирования пассажиропотока призвана решать проблему регулирования интервала движения и количества поездов, это говорит о потенциале использования предложенных систем в данной сфере.

Предложенная модель предоставляет возможность с помощью

интеллектуальных систем описать поведение транспортных потоков с достаточной точностью. Это преимущество можно применять при управлении ресурсами на транспортной сети. Особенно в том случае, когда транспортная обстановка резко меняется и нужно находить оптимальное решение в условиях неопределенности.

Библиографический список

1. Пашченко, А.Ф. Smart-технологии для решения транспортных проблем города / А.Ф. Пашченко, Ф.Ф. Пашченко // *Материалы седьмой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2013)*. – Т.2. – М.: ИПУ РАН. – 2013. – С. 141–144.
2. Thaduri, A. Railway assets: A potential domain for big data analytics / A. Thaduri, D. Galar, U. Kumar // *Procedia Computer Science*. – 2015. – Vol. 53. – P. 457–467.
3. Reinhold, S. The intellectual structure of transportation management research: A review of the literature / S. Reinhold, C. Laesser, D. Bazzi // *Working Paper Series 005*. St. Gallen: SBB Lab, 2015. – 38 p.
4. Pashchenko, F.F. Intelligent Technologies in Decision-Making Support Systems / F.F. Pashchenko, A.F. Pashchenko, C.A. Bui, V.C. Nguyen, D.H. Tran // *2020 International Conference Engineering and Telecommunication (En&T)*. – IEEE, 2020. – 4 p.
5. Van Gerven, M. Artificial neural networks as models of neural information processing / M. Van Gerven, S. Bohte // *Frontiers in Computational Neuroscience*. – 2017. – Vol. 11. – P. 114.
6. Кудинов, Ю.И. Нечеткие модели и системы управления / Ю.И. Кудинов, А.Ю. Келина, И.Ю. Кудинов, А.Ф. Пашченко, Ф.Ф. Пашченко. – М.: ЛЕНАНД, 2017. – 328 с.
7. Захарова, Е.М. Разработка алгоритмов планирования и управления в задачах расписания на железнодорожном транспорте: дис. канд. техн. наук: 05.13.01 / Екатерина Михайловна Захарова. М.: МФТИ, 2018.
8. Пашченко, Ф.Ф. Нейро-нечеткое моделирование пассажиропотоков / Ф.Ф. Пашченко, И.К. Минашина, Е.М. Захарова // *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2013)*. – М.: ИПУ РАН. – 2013. – Т.2. – С. 144–146.
9. Пашченко, Ф.Ф. Использование релаксационных алгоритмов для оценки параметров в нейро-нечетких моделях / Ф.Ф. Пашченко, И.К. Минашина, Е.М. Захарова // *Вестник МАСИ*. – 2013. – Т. 15, Ч. 1. – С. 112–118.

КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

И.В. Каракулов, В.Ю. Столбов

Сформулирована задача классификации состояния насосного оборудования на основании интеллектуального анализа временных рядов. Определены показатели оценки точности классификации. Описаны методы для классификации временных рядов. Выбран наиболее точный метод для классификации технического состояния насосного оборудования с помощью нейросетевого анализа.

Ключевые слова: классификация временных рядов, насосное оборудование, классификация изображений, оценка результатов классификации, мел-спектрограмма, сверточные нейронные сети.

Бесперебойная подача воды – немаловажный фактор комфортной жизни. В связи с этим требуется следить за состоянием оборудования, при помощи которого осуществляется подача воды в водопроводы. Для подачи используются станции первого и второго подъема, при этом первые осуществляют перекачку воды из источника в резервуар, а вторые отвечают за подачу воды из резервуара в систему водоснабжения. Часто такие станции объединяют. На насосных станциях размещают насосные оборудование, измерительные приборы, трубопроводы, электрооборудование. Отсутствие своевременного ремонта, технического обслуживания и превышение гарантийного срока эксплуатации приводит к значительному физическому износу оборудования, вследствие чего к поломкам коммуникаций, обеспечивающих водоснабжение [1]. Насосное оборудование выполняет основную функцию на насосных станциях и обеспечивает прокачку воды. В связи с этим в работе будут рассмотрены поломки только на насосном оборудовании.

Для анализа состояния насосного оборудования, находящегося в эксплуатации, используются различные виды неразрушающего контроля. В работе для анализа состояния используются данные, полученные в процессе вибродиагностики [2]. Осмотр оборудования на предприятии осуществляется в соответствии с графиком плановых проверок и наличии чрезвычайных ситуаций при эксплуатации. Осмотр осуществляет бригада вибродиагностов, измеряя параметры виброскорости в контрольных точках на подшипниковых опорах агрегата, корпусе и на анкерных фундаментных болтах. В связи с тем, что основная нагрузка при работе агрегата осуществляется на подшипники, анализ виброскорости проводился для

замеров, полученных с подшипниковых опор агрегата [3]. Для каждого подшипника были произведены замеры в трех взаимно перпендикулярных направлениях: вертикальном, горизонтально-поперечном и осевом. Полученные данные были обработаны вибродиагностами, а в качестве результата был сформирован отчет о дефектах. Для интеллектуального анализа использовались показатели вибрации, снятые в вертикальном направлении, как наиболее сильно влияющие на техническое состояние оборудования.

Отметим, что компьютерная классификация технического состояния оборудования позволит уменьшить риски, связанные с человеческим фактором, и сократить материальные потери. В связи с этим создаются системы автоматизированной оценки состояния узлов электроприводных центробежных насосов, основанные на знаниях и нечеткой логике [4]. Экспертные системы основываются на различных методах контроля, таких как оценка состояния агрегата при помощи статистического анализа и контроля стабильности вибрации [5]. Так же для выявления аномалий используют методы кодирования и декодирования при помощи сетей, обладающих долговременной краткосрочной памятью [6].

Рассмотрим следующую задачу классификации технического состояния насосного оборудования. Считается, что получены показатели виброускорения с частотой дискретизации 1000 Гц. Вибродиагностами выделено три основных состояния системы: не удовлетворительное, удовлетворительное и хорошее. Проанализировав показания, полученные с датчиков, вибродиагносты составляют отчет, в котором относят каждый замер к одному из трех классов. На основе полученных данных требуется разработать модель классификации показателей виброускорения. Результатом работы модели является состояние насосного оборудования. Пусть x – вектор-функция, которая содержит в себе значения показателей работы оборудования при различном состоянии системы. Тогда X – множество описаний объектов x , а Y – конечное множество меток классов. Предполагается существование целевой функции отображения $f: X \rightarrow Y$, значения которого известны только на объектах обучающей выборки $D = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\} \subset X \times Y$. Требуется построить классификатор $k: X \rightarrow Y$, максимально приближенный к функции f на множестве X [7].

Решение задачи классификации будем проводить с помощью нейросетей сверточного типа. Определение точности работы нейросетей в задачах классификации осуществляется при помощи составления матрицы ошибок. Ошибки бывают четырех типов: истинно-положительные (TP), истинно-отрицательные (TN), ложноположительные (FP), ложноотрицательные (FN). На основе полученных значений вычисляются показатели: точность ($precision$), полнота ($recall$) и $F1$ -мера ($F1$ -measure):

$$precision = \frac{TP}{TP+FP}, \quad (1)$$

$$recall = \frac{TP}{TP+FN}, \quad (2)$$

$$F_1 = (1 + b^2) * \frac{precision*recall}{(b^2*precision)+recall}, \quad (3)$$

где b – коэффициент, определяющий вес $recall$ в метрике. Для подсчета F_1 -меры коэффициент b равнялся 1, поскольку показатели $precision$ и $recall$ равно значимы при решении задачи. В связи с тем, что решается задача мульти классовой классификации и количество образцов в каждом классе отличалось, для определения точности использовался алгоритм, позволяющий определить общую точность, избегая превалирование одного класса над другими. Для каждого из классов высчитывались показатели точности и полноты. Полученные показатели усреднялись относительно всех имеющихся классов и полученные значения использовались для расчета F_1 -меры.

Классификация состояния оборудования осуществлялась при помощи трех различных подходов. Исходный набор данных был разбит на три части: обучающая, валидационная и тестовая. Обучающая часть равнялась 70% от общей выборки, валидационная 20%, а тестовая 10%. Обучение сети проводилось на обучающей и валидационной выборках. Тестовая выборка в обучении не участвовала, а использовалась для подсчета F_1 -меры.

Первый подход основан на использовании мел-спектрограмм [7]. Мел-спектрограмма – это представление частот исходного временного ряда в понятном для человека представлении. Исходный временной ряд преобразовывался в мел-спектрограмму, которая анализировалась при помощи сверточной нейронной сети ResNet-50. На вход сверточной нейронной сети подается изображение мел-спектрограммы, а в качестве результата – класс, к которому относится исходный временной ряд. Исходный временной ряд и полученная спектрограмма представлены на рис. 1 и рис. 2 соответственно.

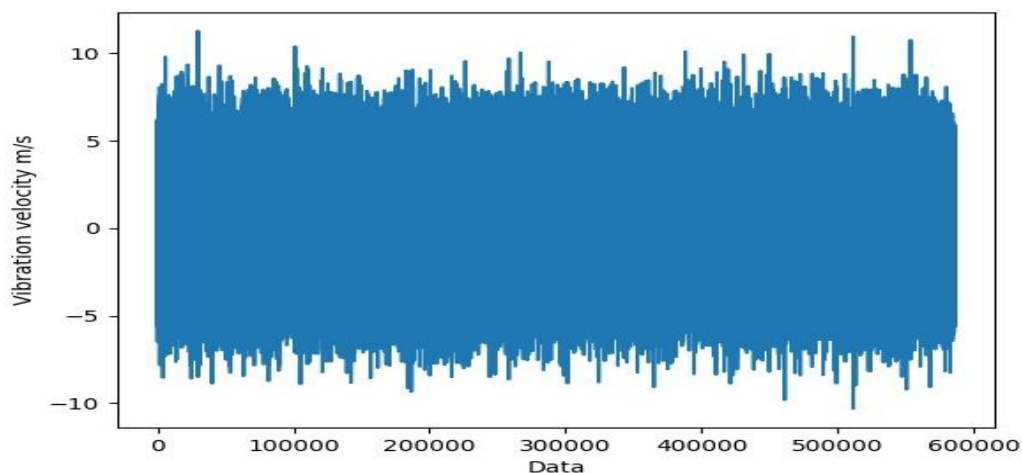


Рис. 1. Исходные данные (виброскорость)

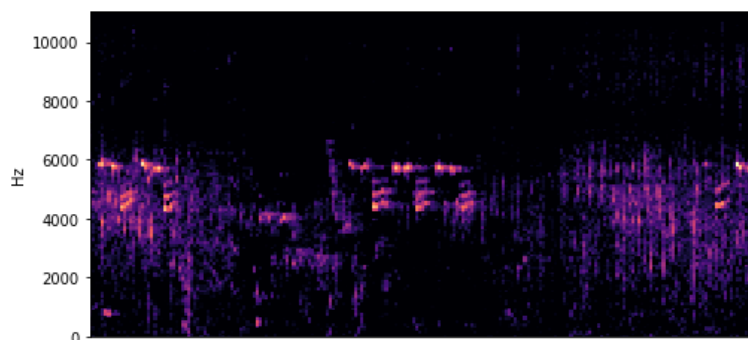


Рис. 2. Мел-спектрограмма

Второй подход основан на классификации временных рядов при помощи рекуррентной нейронной сети LSTM [8]. Модель для классификации временных рядов представлена на рис. 3. На вход сети подается спектр сигнала, полученный при помощи преобразования Фурье. Выходом сети является класс, к которому относится временной ряд. Структура нейронной сети состоит из двух скрытых слоев LSTM, одного слоя dropout, который препятствует переобучению сети и один полно связный слой на выходе сети.

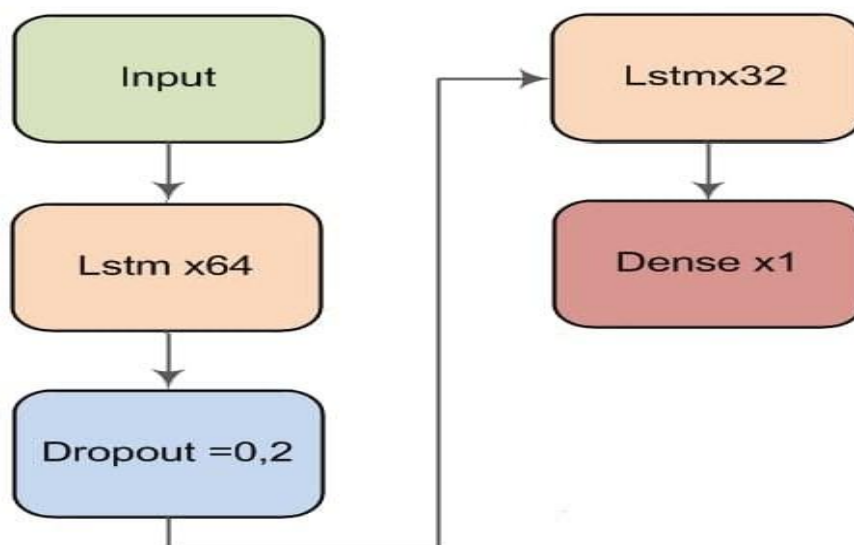


Рис. 3. Конфигурация сети LSTM

Третий подход основан на обработке исходного сигнала при помощи преобразования Фурье и анализа полученного частотного преобразования при помощи 1D-CNN слоя и дальнейшего уменьшения размерности при помощи сверточных слоев [9]. При обучении на выход сети подается класс, соответствующий исходному временному ряду. Архитектура сети представлена на рис. 4.

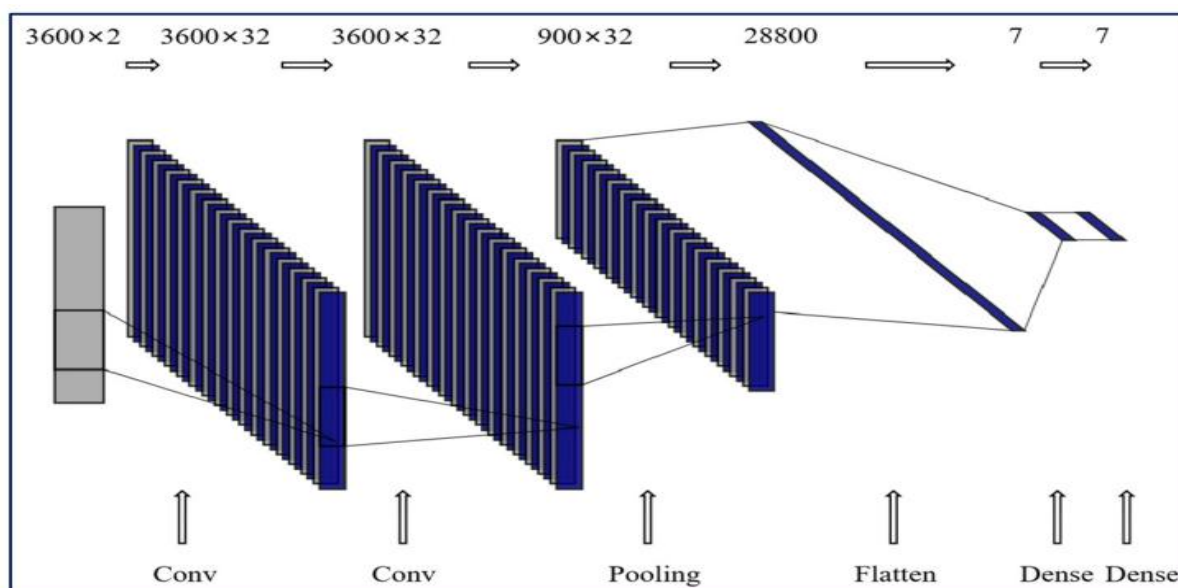


Рис. 4. Конфигурация сверточной нейронной сети

Обучение производилось на компьютере, оснащённом двумя видеокартами nvidiagtx 1080 ti, процессором Intel Core i7, оперативной памятью 64gb. Реализация и обучение сети было осуществлено при помощи Фреймворка Tensorflow.

В табл. 1 представлены усредненные показатели точности, полноты и $F1$ -меры, для каждой сети на основе тестовой выборки.

Таблица 1

Показатели точности, построенные на тестовой выборке

Конфигурация сети	<i>precision</i>	<i>recall</i>	$F1$ -score
Мел-спектрограмма + ResNet50	0,81	0,90	0,85
Преобразование Фурье + LSTM	0,76	0,74	0,74
Преобразование Фурье + CNN	0,79	0,84	0,81

Из табл. 1 видно, что первый подход, основанный на интеллектуальной обработке мел-спектрограмм и применении сверточной нейронной сети, показал наилучший результат классификации.

Заключение. В результате проведенных исследований для решения поставленной задачи классификации состояния электроприводного центробежного насоса были применены три подхода, основанные на предварительной обработке сигнала в виде мел-спектрограмм или преобразования Фурье и последующей классификации при помощи различных нейронных сетей. В результате наилучшие показатели по точности, полноте и $F1$ -мере показала сеть, в основе которой лежат мел-спектрограммы, а классификация осуществлялась при помощи сверточной нейронной сети. На основе полученных результатов можно сделать вывод,

что предварительная предобработка данных в качестве преобразования исходного сигнала в мел-спектрограммы позволяет в среднем улучшить точность классификации на 4-10 % по сравнению с другими подходами.

Библиографический список

1. Шевцов, М.Н. Чрезвычайные ситуации на системах водоснабжения / М.Н. Шевцов, Е.А. Шкамардина // Вестник науки и образования. – 2020. – №1– С. 73–79.
2. Богданов, Е.Л. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования: Учеб. пособие для вузов / Е.Л. Богданов. – М.: Высш. школа, 2006. – 279 с.
3. Ширман, А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. – М.: Наука, 1996. – 276 с.
4. Истомин, Д.А. Экспертная система оценки технического состояния узлов электроцентробежных насосов на основе продукционного представления знаний и нечеткой логики / Д.А. Истомин, В.Ю. Столбов, Д.Н. Платон // Вестник ЮурГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020 – Т. 20, № 1. – С. 133–143.
5. Клячкин, В.Н. Система статистического анализа и контроля стабильности вибраций гидроагрегата / В.Н. Клячкин, Ю.Е. Кувайскова, А.В. Иванова // Программные продукты и системы. – 2018. – №3. – С. 620–625.
6. Абраменкова, К.Н. Применение нейронных сетей для определения остаточного ресурса безотказной работы насосного оборудования нефтегазовой промышленности / К.Н. Абраменкова, Д.Г. Леонов // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2020. – №1. – С. 7.
7. Каракулов, И.В. Классификация технического состояния водонасосного оборудования при помощи сверточных нейронных сетей / И.В. Каракулов // Прикладная математика и вопросы управления. – 2022. – № 2. – С. 37–53.
8. Tan, H.X. Time series classification using a modified LSTM approach from accelerometer-based data: A comparative study for gait cycle detection / H.X. Tan, N.N. Aung, J. Tian, M.C. Chua, Y.O. Yang // Gait & Posture. – 2019. – Vol. 74. – P. 128–134.
9. Zhang, Y. Data Anomaly Detection of Bridge Structures Using Convolutional Neural Network Based on Structural Vibration Signals / Y. Zhang, Y. Lei // Symmetry. 2021. – Vol. 13, Iss. 7. – P. 1186.

СИНТЕЗ ГЕНЕРАТОРА ЗАДАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Ю.Г. Кокунько

При планировании пути следования автономного колесного робота могут возникнуть такие проблемы, как обеспечение безопасности движения, гладкости и ограниченности кривизны пути и скорости ее изменения с учетом проектных ограничений робота как механического объекта управления. Совместное решение этих проблем может привести к громоздким аналитическим расчетам, не реализуемым в реальном времени. В данной работе предлагается упростить и автоматизировать генерацию плоских путей для колесного робота, которая позволит решить обе указанные проблемы. На первом этапе строится примитивный путь в виде плоской ломаной, отрезки которой соединяют опорные точки маршрута и обеспечивают безопасное выполнение рабочего сценария. На втором этапе решается проблема сглаживания сочленений ломаной. Вместо геометрических расчетов строится динамический генератор как копия уравнений движения робота. Синтез корректирующих воздействий генератора, которые имитируют управляющие воздействия робота, осуществляется на основе метода декомпозиции и S-образных гладких и ограниченных нелинейных обратных связей. Это обеспечивает выполнение проектных ограничений робота на скорость, ускорение и управляющие моменты, а выходные переменные генератора будут порождать сглаженный естественным образом путь с допустимой кривизной при отслеживании координат опорной негладкой траектории. Разработанные алгоритмы просты в вычислительном смысле и могут быть реализованы и на этапе планирования, и в реальном времени на бортовом компьютере.

Ключевые слова: колесный робот, реализуемая траектория, динамический генератор, проектные ограничения, сигма-функция.

Базовой задачей при интегрировании робота в конкретный процесс является планирование пути следования. Факторы, влияющие на выбор тех или иных математических методов для планирования движения, обусловлены миссией робота или группы роботов и особенностями решаемых прикладных задач.

В данной работе объектом исследования является беспилотная колесная платформа, которая рассматривается как механический объект управления. Для проектирования законов управления мобильным роботом, как правило,

требуется полное аналитическое описание задающих воздействий или кривой движения в связанной с роботом системе координат для нахождения их производных первого и второго порядков [1–3]. Так как мобильный механизм не может изменять скорость и направление движения мгновенно, требуется обеспечить гладкость и допустимую кривизну заданного пути следования на этапе планирования, т.е. маршрут должен быть не только безопасным, но и практически реализуемым.

Для аналитического описания пути следования используют различные интерполяционные алгоритмы [3–5]. Однако формирование сложных составных маршрутов с обеспечением всех ограничений, обусловленных механической природой объекта управления, требует большого объема вычислений, не всегда выполнимых в реальном времени.

Цель работы состоит в том, чтобы упростить и автоматизировать процесс сглаживания опорной траектории, которая представляет собой набор контрольных точек полигона, соединенных отрезками, и отвечает требованиям безопасности. Координаты этой ломаной рассматриваются как задающие воздействия для виртуального робота. Виртуальный робот – это динамический генератор, построенный в виде уравнений движения центра масс колесной платформы с обратной связью. Использование блочного подхода и S -образных гладких и ограниченных корректирующих воздействий позволит автоматически учитывать проектные ограничения механической системы на скорости и ускорения [6–7]. При отслеживании опорной ломаной выходные переменные генератора будут порождать гладкие кривые, которые служат реализуемыми задающими воздействиями для реального мобильного робота.

За основу для построений берутся уравнения движения центра масс колесной платформы в неподвижной системе декартовых координат $Oxу$ [3, 5, 8]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos \theta, \quad \dot{y} = v \sin \theta; \\ \dot{\theta} &= v u_1, \quad \dot{v} = u_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где x, y – координаты центра масс платформы (выходные переменные), v – ее линейная скорость, в режиме работы $v \neq 0$, θ – угол между осью Ox и центральной линией платформы, совпадающей с направлением вектора скорости; $u = (u_1, u_2)^T$ – вектор управления, элементами которого являются кривизна траектории движения робота u_1 и линейное ускорение u_2 , которые управляются моментами, развиваемыми приводами постоянного тока. Динамика исполнительных устройств в данных построениях не учитывается. Первые три уравнения системы (1) описывают ее кинематику, последнее уравнение добавлено для учета ограничений по линейному ускорению.

Для получения математической модели, имитирующей движение

центра масс колесной платформы и предоставляющей информацию о первых и вторых производных выходных переменных, проводится замена $y_1 = (y_{11} := x, y_{12} := y)^T$, а система (1) представляется в каноническом виде «вход–выход» [9–10]:

$$\dot{y}_1 = y_2, \dot{y}_2 = Bu, \quad (2)$$

где

$$y_2 = (y_{21} := v \cos \theta; y_{22} := v \sin \theta)^T, \quad (3)$$

$$B = \begin{pmatrix} -v^2 \sin \theta & \cos \theta \\ v^2 \cos \theta & \sin \theta \end{pmatrix}, \det B = -v^2 \neq 0, B^{-1} = \begin{pmatrix} -\sin \theta / v^2 & \cos \theta / v^2 \\ \cos \theta & \sin \theta \end{pmatrix}.$$

В силу механической природы объекта управления (2) в режиме движения элементы векторов $y_2(t), \dot{y}_2(t)$ и, следовательно, $u(t)$, должны быть гладкими функциями, ограниченными заданными константами

$$|y_{2j}(t)| \leq Y_2 \leq V / \sqrt{2}, |\dot{y}_{2j}(t)| \leq Y_3 \leq A / \sqrt{2}, t \geq 0, j = 1, 2, \quad (4)$$

$$\|y_2(t)\| = \sqrt{y_{21}^2(t) + y_{22}^2(t)} \leq V, \|\dot{y}_2(t)\| = \sqrt{\dot{y}_{21}^2(t) + \dot{y}_{22}^2(t)} \leq A, V^2 < A,$$

где $V, A = \text{const} > 0$ – проектные ограничения конкретного робота на линейную скорость и ускорение, обусловленные конструкцией механизма и мощностью исполнительных приводов.

Введем динамический генератор, порождающий допустимые для колесного робота задающие воздействия, как копию уравнений системы (2) в виде

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = Bw, \quad (5)$$

где $x_1, x_2, \dot{x}_2 \in R^2$ – векторы положения, скорости и ускорения центра масс виртуального робота, которые будут использоваться в системе управления реальным роботом в качестве задающих воздействий, $w \in R^2$ – корректирующие воздействия генератора. Цель управления системой (5) заключается в обеспечении выполнения ограничений (4), а именно,

$$|x_{2j}(t)| \leq Y_2, |\dot{x}_{2j}(t)| \leq Y_3, t \geq 0, j = 1, 2, \quad (6)$$

в процессе отслеживании выходными переменными генератора $x_1(t) = (x_{11}, x_{12})^T$ задающих воздействий $\chi(t) \in R^2$. Элементами вектора $\chi = (\chi_1, \chi_2)^T$ являются координаты опорной траектории в неподвижной системе декартовых координат. Предполагается, что составленный в первом приближении опорный путь отвечает требованиям безопасности, но не является гладким. В простейшем случае он представляет собой набор контрольных точек полигона, соединенных прямыми линиями. Точки сочленений отрезков ломаной являются особыми, в них элементы вектора

$\dot{\chi} = (\dot{\chi}_1, \dot{\chi}_2)^T$ имеют конечные разрывы. В общем случае текущие значения $\dot{\chi}(t)$ могут быть не известны, но являются ограниченными

$$|\dot{\chi}_j(t)| \leq X_2 < Y_2, t \geq 0, j = 1, 2. \quad (7)$$

Корректирующие воздействия генератора (5) имитируют управляющие воздействия системы (2), которые также являются задающими воздействиями для исполнительных приводов. На основе этого выбираем $w(t)$ из класса гладких и ограниченных функций с ограниченными производными, например, сигма-функцию $\sigma(x) = -\text{th}(-x/2)$ [6–7]. Для ее масштабирования вводим множитель $k = \text{const} > 0$ для ее аргумента, а именно

$$\sigma(kx) = \frac{2}{1 + \exp(-kx)} - 1, \quad (8)$$

где k играет роль большого коэффициента. Сигма-функция определена на всей числовой оси, она гладкая, ограниченная $|\sigma(kx)| < 1$ и имеет ограниченную производную

$$\sigma'(kx) = 0,5k(1 - \sigma^2(kx)), 0 < \sigma'(kx) \leq 0,5k, x \in R.$$

Предлагается использовать сигма-функцию (8) также в локальной связи для того, чтобы выполнить заданные ограничения по скорости изменения выходных переменных (6).

Введя ошибку слежения $e_1 = x_1 - \chi$, $e_1 = (e_{11}, e_{12})^T$, ее производную $\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\chi}$, сигмоидальную локальную связь $x_2 = -m_1\sigma(k_1e_1)$, $\sigma(k_1e_1) = (\sigma(k_1e_{11}), \sigma(k_1e_{12}))^T$, $m_1, k_1 = \text{const} > 0$ и невязку

$$e_2 = x_2 + m_1\sigma(k_1e_1), e_2 = (e_{21}, e_{22})^T, \quad (9)$$

представим систему (5) в координатном базисе ошибки слежения и невязки (9)

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= -m_1\sigma(k_1e_1) + e_2 - \dot{\chi}, \\ \dot{e}_2 &= 0,5m_1k_1\Lambda_1(x_2 - \dot{\chi}) + Bw, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\Lambda_1 = \text{diag}(\Lambda_{1j}), \Lambda_{1j} = 1 - \sigma^2(k_1e_{1j}), 0 < \Lambda_{1j} \leq 1, j = 1, 2. \quad (11)$$

Сформируем в системе (10) сигмоидальные корректирующие воздействия в виде

$$\begin{aligned} w &= -B^{-1}(m_2\sigma(k_2e_2) + 0,5m_1k_1\Lambda_1x_2), m_2, k_2 = \text{const} > 0, \\ \sigma(k_2e_2) &= (\sigma(k_2e_{21}), \sigma(k_2e_{22}))^T \end{aligned} \quad (12)$$

и получим замкнутую виртуальную систему

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= -m_1\sigma(k_1e_1) + e_2 - \dot{\chi}, \\ \dot{e}_2 &= -m_2\sigma(k_2e_2) - 0,5m_1k_1\Lambda_1\dot{\chi}. \end{aligned} \quad (13)$$

В малой окрестности нуля сигма-функция близка к линейной функции, а на бесконечности – стремится к функции знака, поэтому ее можно ограничить снизу кусочно-линейной функцией:

$$m_i |\sigma(k_i e_{ij})| \geq \begin{cases} 0,8m_i, & |e_{ij}| > \Delta_i, i=1,2, j=1,2, \\ 0,8m_i k_i |e_{ij}|/2, & |e_{ij}| \leq 2,2/k_i \leq \Delta_i. \end{cases} \quad (14)$$

В системе (13) $\dot{\chi}(t)$ трактуется как внешнее ограниченное возмущение (7). Поэтому амплитуды $m_{1,2}$ выбираются так, чтобы обеспечить инвариантно по отношению к возмущению последовательное попадание невязки (9) и ошибки слежения в некоторые окрестности нуля:

$$\begin{aligned} |e_{2j}(t)| &\leq 2,2/k_2 \leq \Delta_2, t > t_2 \geq 0; \\ |e_{1j}(t)| &\leq 2,2/k_1 \leq \Delta_1, t > t_1 \geq t_2, j=1,2. \end{aligned} \quad (15)$$

Анализируя достаточные условия устойчивости системы (13) на основе функции Ляпунова, получим, что верхнее, а затем и нижнее неравенства (14) будут выполнены при любых начальных значениях переменных системы (13), если

$$0,5m_1 k_1 X_2 < 0,8m_2, 2,2/k_2 + X_2 < 0,8m_1. \quad (16)$$

Заметим, что динамический генератор будет спроектирован в виде замкнутой системы (5), (12)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -m_2 \sigma(k_2(x_2 + m_1 \sigma(k_1(x_1 - \chi)))) - \\ &- 0,5m_1 k_1 \begin{pmatrix} 1 - \sigma^2(k_1(x_{11} - \chi_1)) & 0 \\ 0 & 1 - \sigma^2(k_1(x_{12} - \chi_2)) \end{pmatrix} x_2, \end{aligned} \quad (17)$$

а виртуальная система (13) была введена для анализа устойчивости ошибок слежения. Выбор амплитуд, удовлетворяющих (16), обеспечит выполнение (15) при $t \geq 0$, если $|e_{ij}(0)| \leq 2,2/k_i, i=1,2, j=1,2$. Для этого устанавливаются подходящие начальные значения в генераторе (17), например

$$\begin{aligned} x_{1j}(0) &= \chi_j(0) \Rightarrow e_{1j}(0) = 0, \\ |x_{2j}(0)| &\leq 2,2/k_2 \Rightarrow |e_{2j}(0)| \leq 2,2/k_2, j=1,2. \end{aligned} \quad (18)$$

Тогда в замкнутой системе (17) в силу (9) гарантируется ограниченность скорости и ускорения

$$|x_{2j}(t)| \leq 2,2/k_2 + 0,8m_1, |\dot{x}_{2j}(t)| \leq m_2 + 0,5m_1 k_1 (2,2/k_2 + 0,8m_1) j=1,2, t \geq 0. \quad (19)$$

Для выбора допустимых параметров сигмоидальной обратной связи с учетом (6), (16) и (19) получены системы совместных неравенств

$$\begin{cases} 2,2/k_2 + X_2 < 0,8m_1 \leq Y_2 - 2,2/k_2, \\ 0,625m_1k_1X_2 < m_2 \leq Y_3 - 0,5m_1k_1Y_2, Y_2^2 < Y_3. \end{cases} \quad (20)$$

В них \bar{k}_2 – максимальное допустимое значение большого коэффициента k_2 , определяемое проектными ограничениями на управляющие моменты исполнительных приводов. Это значение определяет выбор начальных значений (18), предельную точность стабилизации невязки $|e_{2j}(t)| \leq 2,2/\bar{k}_2, j=1,2, t \geq 0$ и ограничения на скорость изменения опорного задающего воздействия (7): $4,4/k_2 + X_2 < Y_2 \Rightarrow X_2 < Y_2 - 4,4/\bar{k}_2$. Далее, на основе первого неравенства (20) принимается конкретное значение $m_1 = \bar{m}_1$, которое определяет максимально возможное значение большого коэффициента $0 < k_1 \leq \bar{k}_1 = 0,9Y_3/(Y_2\bar{m}_1)$ и предельную точность стабилизации ошибки слежения $|e_{1j}(t)| \leq 2,475Y_2\bar{m}_1/Y_3, j=1,2, t \geq 0$. А при конкретных значениях m_1, k_1 принимается конкретное значение m_2 .

Таким образом, изображающая точка (x_{11}, x_{12}) динамического генератора (17)–(18) порождает допустимую сглаженную опорную траекторию с непрерывной ограниченной кривизной. А переменные генератора $x_1(t), x_2(t), \dot{x}_2(t) \in R^2$ поступают в качестве задающих воздействий в информационно-управляющую систему для формирования закона управления движением.

Для верификации разработанных алгоритмов было проведено численное моделирование для колесной платформы, развивающей максимальную скорость в 2,4 м/с и ускорение 6 м/с². Динамический генератор (17) был смоделирован в системе MATLAB-Simulink, для численного интегрирования был использован метод Эйлера с шагом 0,01.

Задающее воздействие, определяющее желаемую траекторию движения робота, в первом приближении задавалось в виде непрерывной, но не гладкой, плоской кривой

$$\begin{aligned} \chi_1 &= 0, \chi_2 = 2t, \quad t \in [0;5); \\ \chi_1 &= 2t - 10, \chi_2 = 10, \quad t \in [5;10); \\ \chi_1 &= 10, \chi_2 = 30 - 2t, \quad t \in [10;15); \\ \chi_1 &= 40 - 2t, \chi_2 = 0, \quad t \in [15;20); \\ \chi_1 &= 0, \chi_2 = 2t - 40, \quad t \geq 20, \chi_j [м], t [с]. \end{aligned} \quad (21)$$

С помощью неравенств (20) были определены следующие параметры сигмоидальных корректирующих воздействий генератора:

$$m_1 = 2,2, m_2 = 5, k_1 = 1, k_2 = 5. \quad (22)$$

На рис. 1 представлен график опорной кривой (21) и точки генератора

$(x_{11}(t), x_{12}(t))$ (17), (22). Он демонстрирует сглаживание траектории на стыках. На рис. 2 представлены графики для $x_{21}(t)$ и \dot{x}_{21} , соответственно. Для второй координаты графики аналогичны. Как видно из графиков, заданные ограничения на скорость и ускорение обеспечиваются.

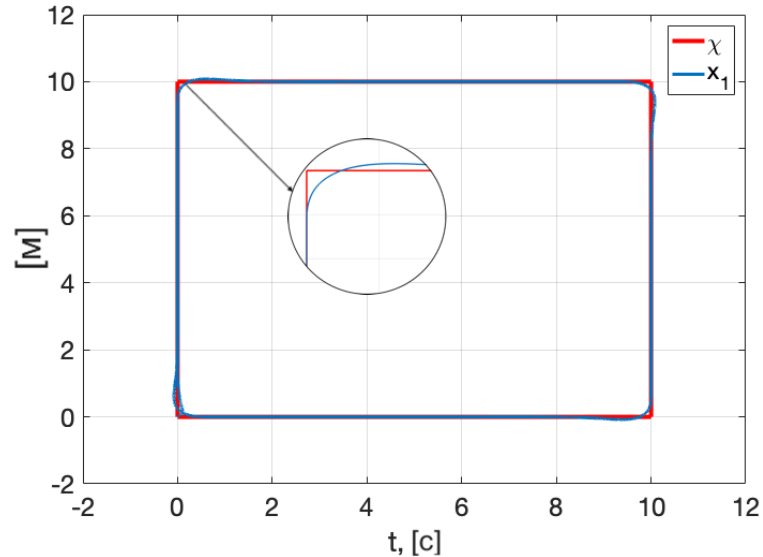


Рис. 1. График опорной кривой $\chi(t) = (\chi_1, \chi_2)$ [м] и точки генератора $x_1(t) = (x_{11}, x_{12})$ [м]

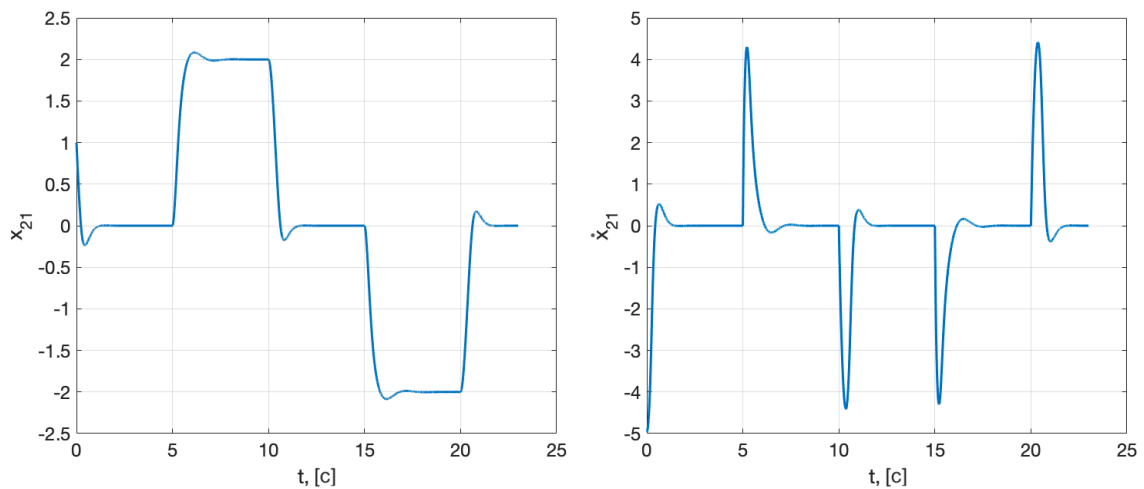


Рис. 2. График $x_{21}(t)$ [м/с] и $\dot{x}_{21}(t)$ [м/с²]

Заключение. Основным результатом работы – метод проектирования динамического генератора реализуемых задающих воздействий, который позволяет учитывать проектные ограничения на скорость и ускорение колесной платформы на этапе синтеза и обеспечивает автоматическое сглаживание стыков опорного негладкого маршрута, составленного в первом приближении. Его использование позволит расширить область применения стандартных методов проектирования обратных связей для

решения задач путевой стабилизации и упростит процесс планирования режима движения. Результаты численного моделирования подтвердили эффективность разработанных алгоритмов, простых в численной реализации.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-01-00363А).

Библиографический список

1. Пестерев, А.В. Синтез стабилизирующего управления в задаче следования колесного робота вдоль заданной кривой / А.В. Пестерев // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 7. – С. 25–39.
2. Пестерев, А.В. Каноническое представление нестационарной задачи путевой стабилизации / А.В. Пестерев, Л.Б. Рапопорт, С.Б. Ткачев // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2015. – Т. 54, № 4. – С. 160–176.
3. Кочетков, С.А. Метод декомпозиции в задачах управления мобильными роботами / С.А. Кочетков, В.А. Уткин // Автоматика и телемеханика. – 2011. – № 10. – С. 86–103.
4. Kochetkov, S.A. Mobile robot trajectory control under influence of unknown perturbation / S.A. Kochetkov // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace. – 2019. – Vol. 10, No. 4. – P. 725–732.
5. Belinskaya, Yu. Application of the covering method for trajectories design for car-like robot / Y. Belinskaya // In: Proceedings of 2021 Fourteenth International Conference Management of large-scale system development (MLSD). – Moscow, Russia. – 27–29 September 2021.
6. Kokunko, Yu. Synthesis of a tracking system with restrictions on UAV state variables / Yu. Kokunko, S. Krasnova // Mathematics in Engineering, Science and Aerospace. – 2019. – Vol. 10, No. 4. – P. 695–705.
7. Антипов, А.С. Синтез инвариантных нелинейных одноканальных систем слежения с сигмоидальными обратными связями с обеспечением заданной точности слежения / А.С. Антипов, С.А. Краснова, В.А. Уткин // Автоматика и телемеханика. – 2022. – № 1. – С. 40–66.
8. Webb, D.J. Kinodynamic RRT*: asymptotically optimal motion planning for robots with linear dynamics / D.J. Webb, J. van der Berg // In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – Karlsruhe, Germany. – May 6–10, 2013. – P. 5039–5046.
9. Краснова, С.А. Анализ и синтез минимально-фазовых нелинейных SISO-систем при действии внешних несогласованных возмущений / С.А. Краснова, А.В. Уткин // Проблемы управления. – 2014. – № 6. – С. 22–30.
10. Краснов, Д.В. Синтез многофункциональной системы слежения в условиях неопределенности / Д.В. Краснов, А.В. Уткин // Управление большими системами. – 2017. – Вып. 69. – С. 29–49.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИЕЙ ГАЗА ПРИ ПОСТОЯННОМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ ПОТЕНЦИАЛЕ

М.И. Костючек

Рассмотрены задачи оптимального управления при фильтрации газа по закону Дарси при постоянном термодинамическом потенциале. В данной работе управляющими параметрами являются интенсивности добычи и закачки в скважину. Сначала рассмотрена задача оптимального управления, где минимизируется среднеквадратическое отклонение давления. Для этой задачи выписаны уравнения для нахождения точек минимума, которые, в общем случае, являются нелинейными. Далее рассматривается задача нахождения оптимальных интенсивностей из принципа минимума информации.

Ключевые слова: закон Дарси, асимптотика по времени, оптимальное управление, принцип минимума информации.

В работе рассмотрены две задачи оптимального управления: минимизация среднеквадратического отклонения давления газа от среднего значения и нахождение оптимального управления из принципа минимума информации (или принципа максимума энтропии). Процесс фильтрации описывают закон сохранения массы и закон Дарси. Предполагается, что добыча происходит при постоянном, заранее заданном термодинамическом потенциале: энтропии, энтальпии или свободной энергии Гиббса. Также предполагается, что нам известны точки расположения скважин и задана суммарная интенсивность.

В первой части работы приведены уравнения, описывающие фильтрацию газа (см. [1], [2]). В работе [1] предложен подход к описанию термодинамики реальных газов, а в работе [2] рассмотрена фильтрация реальных газов при постоянной энтальпии. Далее исследована задача оптимального управления фильтрацией реальных газов, минимизирующая среднеквадратическое отклонения давления от среднего по объему. Наконец, в третьей части работы, решена задача оптимального управления фильтрацией основанная на принципе минимума информации [3]. Похожая задача рассматривалась в работе [4], где находились оптимальные интенсивности откачки жидкости в двухфазной модели Бакли-Левретта.

Модель. Термодинамика реальных газов описывается термическим и калорическим уравнениями состояния. Термическое уравнение состояния газа имеет вид

$$p = RT\varphi_v, \quad (1)$$

где p – давление газа, R – универсальная газовая постоянная, T – температура газа, v – удельный объем, φ – термодинамический потенциал Масье–Планка.

Будем рассматривать фильтрацию в трехмерной пористой среде D . Граница области ∂D является непроницаемой. Пусть $x = (x_1, x_2, x_3)$ – декартовы координаты в области D , t – время.

Процесс фильтрации описывает система дифференциальных уравнений, представляющих собой закон сохранения массы

$$\frac{\partial(m\rho)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho U) = 0, \quad (2)$$

и закон сохранения импульса, или закон Дарси

$$U = -\frac{k}{\mu} \nabla p, \quad (3)$$

где $\rho = 1/V$ – плотность, U – скорость газа, m – пористость среды, т.е. доля объема пор в общем объеме пористой среды, k – коэффициент проницаемости среды, μ – коэффициент динамической вязкости газа. В дальнейшем будем предполагать, что пористая среда не деформируема, т.е. пористость зависит только от координат.

Предполагаем также, что фильтрация происходит при постоянстве одного из термодинамических потенциалов, таких как энтропии, энтальпии или свободной энергии Гиббса. В этом случае систему (2)–(3) можно записать только для одной неизвестной функции, например, для плотности газа ρ .

Пусть α_c – фиксированное значение термодинамического потенциала $f(\rho, T)$. Тогда из уравнения $f(\rho, T) = \alpha_c$ мы находим зависимость плотности ρ от температуры T , а из уравнения (1) находим зависимость давления p от плотности ρ при фиксированном значении термодинамического потенциала α_c :

$$p = p(\rho), \quad (5)$$

здесь и далее мы опустим зависимость давления p от α_c .

С учетом (5) система (2)–(3) примет вид уравнения

$$\operatorname{div} \left(\frac{k}{\mu} p'(\rho) \nabla \rho \right) = m \frac{\partial \rho}{\partial t}.$$

Это уравнение можно переписать в виде

$$\Delta(Q(\rho)) = m \frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (6)$$

где фигурирует функция Лейбенсона:

$$Q(\rho) = \int \frac{k}{\mu} \rho p'(\rho) d\rho.$$

Предположим, что на границе ∂D задано значение плотности газа $\rho_c(\eta, t)$, $\eta \in \partial D$. Введем безразмерное время $t' = t/\tau$, где τ – характерное время фильтрации, пусть $\varepsilon = 1/\tau$. Тогда уравнение (6) примет вид

$$\Delta(Q(\rho)) = \varepsilon m \frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (7)$$

Предполагая, что $\varepsilon \ll 1$, представим асимптотическое решение уравнения (7) в виде ряда по малому параметру ε :

$$\rho(x, t) = \sum_{j \geq 0} \frac{\varepsilon^j}{j!} \rho_j(x, t).$$

Уравнение для нулевого члена асимптотика имеет вид $\Delta u_0 = 0$, где $u_0 = Q(\rho_0)$.

Граничное условие для u_0 имеет вид $u_0|_{\partial D} = u_{c0}$, где $u_{c0} = Q(\rho_{c0})$.

Предположим также, что внутри области D в точках a_i расположены скважины с интенсивностью $c_i(t')$, $i = \overline{1, m}$. На нагнетательных скважинах интенсивности положительные, а на добывающих – отрицательные.

Функцию u_0 находим из решения задачи Дирихле

$$\begin{cases} \Delta u_0 = \sum_i c_i(t') \delta_{a_i}, x \in D \\ u_0|_{\partial D} = u_{c0} \end{cases}$$

где $\delta_{a_i} = \delta(x - a_i)$ – дельта-функция Дирака.

Решение этой задачи имеет вид

$$u_0(x, t) = \frac{1}{4\pi} \sum_i c_i \left[-\frac{1}{|x - a_i|} + \int_{\partial D} \frac{1}{|\eta - a_i|} \frac{\partial G}{\partial n_\eta} dS_\eta \right] + \int_{\partial D} u_{c0} \frac{\partial G}{\partial n_\eta} dS_\eta, \quad (8)$$

где $G(\eta, x)$ – функция Грина ($\Delta G = -\delta_\eta$) для задачи Дирихле в области D , удовлетворяющая граничному условию $G|_{x \in \partial D} = 0$, dS – элемент площади границы ∂D , индекс η показывает переменную интегрирования,

$$\frac{\partial}{\partial n} = \nabla \cdot n, \quad \frac{\partial}{\partial n_\eta} = \nabla_\eta \cdot n.$$

Минимизация отклонения давления. Пусть задано суммарное значение интенсивностей $c = \sum_i c_i$ и известны расположения скважин a_i , $i = \overline{1, m}$. Находим интенсивности, при которых достигается минимум

среднеквадратичного отклонение давления от среднего значения по объему

$$D = \frac{1}{W} \int_D (p - \langle p \rangle)^2 dV_\eta \rightarrow \min,$$

здесь W – объем области D ,

$$\langle p \rangle = \frac{1}{W} \int_D p(\eta) dV_\eta, \eta \in D.$$

Представим величину D в виде

$$D = \langle p^2 \rangle - \langle p \rangle^2. \quad (9)$$

Пусть $q_i = c_i / c$, тогда

$$1 = \sum_i q_i.$$

Критические точки функции D при условии

$$q_m = 1 - \sum_{i=1}^{m-1} q_i$$

находятся из уравнений

$$\frac{\partial D}{\partial q_i} - \frac{\partial D}{\partial q_m} q_i = 0, \quad i = \overline{1, m-1}.$$

Отсюда

$$\frac{\partial D}{\partial q_m} = \frac{1}{q_i} \frac{\partial D}{\partial q_i}, \quad (10)$$

где

$$\frac{\partial D}{\partial q_i} = \frac{\partial \langle p^2 \rangle}{\partial q_i} - 2 \langle p \rangle \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial q_i},$$

$$\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial q_i} = \frac{1}{W} \int_D \frac{\partial p}{\partial q_i} dV_\eta,$$

$$\frac{\partial \langle p^2 \rangle}{\partial q_i} = \frac{1}{W} \int_D 2p \frac{\partial p}{\partial q_i} dV_\eta.$$

Для приближения нулевого порядка имеем

$$u_0 = \sum_i q_i f_i + f_0,$$

$$f_i = c \frac{1}{4\pi} \left[-\frac{1}{|x - a_i|} + \int_{\partial D} \frac{1}{|\eta - a_i|} \frac{\partial G}{\partial n_\eta} dS_\eta \right], \quad f_0 = \int_{\partial D} u_{c0} \frac{\partial G}{\partial n_\eta} dS_\eta,$$

$$\frac{\partial_1 p}{\partial_1 q_i} = \frac{dp}{d\rho_0} \frac{d\rho_0}{du_0} \frac{\partial_1 u_0}{\partial_1 q_i},$$

$$\frac{d\rho_0}{du_0} = \left(\frac{du_0}{d\rho_0} \right)^{-1} \Big|_{\rho_0=Q^{-1}(u_0)} = \left(\frac{dQ(\rho_0)}{d\rho_0} \right)^{-1} \Big|_{\rho_0=Q^{-1}(u_0)} = \frac{\mu}{k} \frac{1}{\rho_0 p'(\rho_0)} \Big|_{\rho_0=Q^{-1}(u_0)},$$

$$\frac{\partial u_0}{\partial q_i} = f_i,$$

$$\frac{\partial p}{\partial q_i} = p'(\rho_0) \frac{\mu}{k} \frac{1}{\rho_0 p'(\rho_0)} f_i = \frac{f_i \mu}{k \rho_0}.$$

Уравнения (10) являются нелинейными, поэтому для их решения используются численные методы решения систем уравнений. Также можно использовать методы градиентного спуска. Заметим, что производные функции (9) по q_i имеют вид

$$\frac{\partial D}{\partial q_i} = \frac{2}{W_D} \int_D (p - \langle p \rangle) \left(\frac{\partial p}{\partial q_i} - q_i \frac{\partial p}{\partial q_m} \right) dV_\eta.$$

В случае приближения нулевого порядка получаем следующее

$$\frac{\partial D}{\partial q_i} = \frac{2}{W_D} \int_D \frac{\mu}{k \rho_0} (p - \langle p \rangle) (f_i - q_i f_m) dV_\eta.$$

Принцип минимума прироста информации. Принцип минимума прироста информации позволяет находить q_i , которые интерпретируются как распределение вероятности дискретной случайной величины при заданной системе ограничений.

Пусть задана случайная величина X , принимающая значения x_i с вероятностями q_i . Так например, в качестве величин x_i можно рассматривать расстояния от i -й скважины до некоторой фиксированной точки, либо до границы ∂D , а также стоимость добычи из i -й скважины.

Прирост информации распределения случайной величины X имеет вид

$$S(q) = \sum_i q_i \ln q_i,$$

ограничения задаются на среднее значение $A = \sum_i q_i x_i$ и среднее квадрата

$$B = \sum_i q_i x_i^2, \text{ которое связано с дисперсией } D_x = B - A^2.$$

Будем искать величины q_i , как минимум функции S при ограничениях $A = \sum_i q_i x_i$, $B = \sum_i q_i x_i^2$. Используя метод множителей Лагранжа, ищем минимум функции

$$L = S(q) - \lambda_0 \left(\sum_i q_i - 1 \right) - \lambda_1 \left(\sum_i q_i x_i - A \right) - \lambda_2 \left(\sum_i q_i x_i^2 - B \right).$$

Условие $\frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$ дает $q_i = e^{\lambda_0 - 1} e^{\lambda_1 x_i + \lambda_2 x_i^2}$. С учетом условия нормировки $1 = \sum_i q_i$ получаем

$$q_i = \frac{1}{Z(\lambda)} e^{\lambda_1 x_i + \lambda_2 x_i^2}, \quad Z(\lambda) = \sum_i e^{\lambda_1 x_i + \lambda_2 x_i^2}.$$

Коэффициенты λ_1, λ_2 находятся из системы уравнений

$$\frac{\partial Z}{\partial \lambda_1} = AZ, \quad \frac{\partial Z}{\partial \lambda_2} = BZ.$$

Отметим, что решение этой системы можно найти с помощью преобразования Лежандра, примененного к функции $\ln Z$.

Отметим также, что принцип минимума прироста информации может быть использован для планирования расположения скважин a_i и определения интенсивностей c_i .

Благодарности и поддержка. Автор выражает благодарность Лычагину Валентину Васильевичу за ценные замечания и помощь в подготовке работы.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-71-20034).

Библиографический список

1. Lychagin, V.V. Thermodynamics as a Theory of Measurement / V.V. Lychagin // Journal of Geometry and Physics. – 2022. – Vol. 172. – P. 104430 (1–24).
2. Костючек, М.И. Фильтрация газа Ландау-Лифшица при постоянной энтальпии / М.И. Костючек, В.В. Лычагин // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование. – 2022. – С. 49–51.
3. Evans, Ralph A. The Principle of Minimum Information / Ralph A. Evans // IEEE Transactions on Reliability. – 1969. – Vol. R-18, Iss. 3. – P. 87–90.
4. Akhmetzianov, A.V. Optimal Management of Oil Field Development in the Buckley–Leverett Model / A.V. Akhmetzianov, A.G. Kushner, V.V. Lychagin // Automation and Remote Control. – 2018. – Vol. 79. – P. 641–654.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АКТИВНОГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

Л.Ю. Костылева, О.В. Логиновский

Методами математического и компьютерного моделирования исследовано тепловое состояние трехслойной сталеалюминиевой пластины с дефектом в виде воздушной прослойки между металлами в процессе активного теплового неразрушающего контроля. Получены расчетные данные, на основе которых построены распределения температурного сигнала по поверхности пластины со стороны дефекта при различных режимах нагрева, мощности теплового потока, взаимного расположения источника тепловой стимуляции и устройства регистрации температуры, а также определена зависимость температурного сигнала над дефектом от времени нагрева. Выполнено сравнение результатов моделирования, полученных с применением различных численных методов.

Ключевые слова: биметаллы, активный тепловой неразрушающий контроль, численное моделирование, дефект соединения между слоями металлов, дефектоскопия.

Многослойные биметаллические материалы позволяют получить новые свойства производимых изделий при экономии дефицитных или дорогостоящих материалов. Сочетание металлов с различными свойствами позволяет получить повышенные прочностные характеристики, стойкость к коррозии, истиранию, износу рабочих поверхностей деталей и узлов, высокие режущие свойства обрабатывающего инструмента, снижение веса конструкций и соединений [1].

Одним из распространенных видов дефектов многослойных металлических композитов является нарушение сплошности соединения слоев металлов, появление воздушных пузырей между ними. Расслоения могут возникать в местах концентрации напряжений, в зонах скачкообразного изменения толщины материала из-за несовершенств технологии производства композита, при воздействии эксплуатационных нагрузок или при дальнейшей обработке [1]. Подобные дефекты представляют собой довольно большую опасность, так как это может достаточно быстро привести к частичному или полному хрупкому разрушению детали в процессе эксплуатации, поэтому их выявление является актуальной задачей.

В дефектоскопии для контроля биметаллических изделий применяют различные методы неразрушающего контроля, наиболее распространенным среди которых является ультразвуковая диагностика [2]. При многих

преимуществах ультразвукового контроля довольно перспективным в плане простоты и доступности является метод активного теплового контроля (ТК), при котором исследуемое изделие подвергается тепловому воздействию посредством источника теплового нагружения [2, 3].

Тепловой (тепловизионный) контроль – это метод дистанционной регистрации, визуализации и анализа тепловых (температурных) полей объектов. Температура как количественный показатель внутренней энергии является универсальной характеристикой объектов и процессов физического мира, в котором непрерывно происходит генерация, преобразование, передача, накопление и использование энергии в ее различных формах [3, 4]. Температура поверхности объекта изменяется под влиянием теплофизических, геометрических характеристик и параметров нагрузки. Внутренняя структура объекта также влияет на характер теплового излучения. Особенности и дефекты структуры вызывают появление аномальных температурных зон на поверхности объекта, анализ которых позволяет судить о наличии изменений в материале в целом или на отдельных участках.

В отличие от ультразвукового, тепловой контроль можно применять как для стационарных, так и для движущихся объектов, находящихся в различном тепловом состоянии, в различных условиях среды (температура, давление, влажность). Современные модели тепловизоров имеют малые габариты и вес, не требуют охлаждения и стоят дешевле ультразвуковых дефектоскопов при сравнимых функциональных возможностях.

Тепловой метод неразрушающего контроля применяется при обследовании металлических изделий, строительных материалов, теплоизоляционных и огнеупорных покрытий, авиационной техники, энергетического и электрооборудования, опасных объектов для выявления различных видов дефектов (трещин, нарушений изоляции, расслоений в местах сварки или склейки, пор, пустот и раковин, посторонних включений и примесей).

Система активного ТК исследуемого объекта (рис. 1) должна обеспечить управление источником теплового нагружения для установления заданного режима нагрева, получение данных температурного поля через определенные промежутки времени, сбор и хранение данных в виде последовательности значений температур или изображений (термограмм), их передачу для обработки специализированной программой. Накопление и обработка полученной информации о тепловых полях позволят сформировать зависимости, позволяющие по результатам обработки термограмм не только найти дефект, но и определить его тип, параметры, глубину залегания и пр. Основным информативным параметром при выявлении дефектов методом ТК служит величина дифференциального температурного сигнала – температурного перепада над аномальным

участком. Она определяется как локальная разность температур поверхности объекта, измеренных над дефектной областью и участком без дефекта [2, 3]. Величина температурного сигнала изменяется в процессе нестационарного нагрева (охлаждения), достигая максимального значения в определенный момент времени. Для металлов данный момент составляет от долей секунд до десятков секунд, для неметаллов может достигать десятков минут, в зависимости от теплофизических и геометрических характеристик объекта, глубины залегания и типа дефекта [2, 3]. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо выбирать оптимальный момент регистрации температурного сигнала в зависимости от параметров объекта контроля и режима нагрева.



Рис. 1. Структура системы активного теплового контроля многослойных биметаллических пластин

В большинстве случаев используют процедуры импульсного активного ТК, поскольку в стационарном режиме сигналы от дефектов нивелируются из-за выравнивания температуры по объему тела, а в условиях теплообмена с окружающей средой разность температур среды и тела не позволяет достичь достаточного значения амплитуды сигнала.

Оптимальное соотношение параметров режима нагрева и времени контроля можно выявить в ходе натурального эксперимента. Однако для биметаллических пластин подготовка экспериментальных образцов с заданными параметрами дефектов является технологически сложной и дорогостоящей задачей. Поэтому немаловажным является этап моделирования, в ходе которого можно с определенными допущениями имитировать процесс изменения теплового состояния объекта контроля с целью определения момента времени, когда величина температурного

сигнала достигает оптимального значения при выбранной мощности тепловой стимуляции.

Для исследования теплового состояния многослойной пластины разрабатывается математическая модель в виде системы линейных и нелинейных дифференциальных уравнений, которые описывают распределение теплового поля в материале с переменными теплофизическими характеристиками под влиянием условий контакта между слоями пластины, воздействия источников теплового нагружения и условий окружающей среды. Для определения поперечного размера дефекта используются двух- и трехмерные модели, так как они позволяют учитывать рассеяние тепла вокруг участка многослойного материала с нарушенной структурой и более корректно определять температурный сигнал над дефектом [3, 5].

Решение многомерных нелинейных задач теплопереноса в аналитической форме часто сопряжено с большими математическими трудностями и не всегда возможно. В таких ситуациях применяют численные методы на основе сеточной аппроксимации исследуемого объекта – метод конечных разностей (МКР), методы конечных элементов (МКЭ) и граничных элементов (МГЭ). Они предполагают замену исходных дифференциальных уравнений алгебраическими за счет дискретизации объекта моделирования [5–7].

Для разработки модели теплового контроля многослойного биметаллического материала с дефектами опишем свойства объекта и условия проведения моделирования.

Объект контроля представляет собой трехслойную пластину, наружные слои которой 1 (толщиной h_1) и 3 (толщиной h_3) изготовлены из нержавеющей стали, а между ними находится теплораспределительный слой 2 (толщиной h_2) из алюминия или меди, при этом тепловой поток от источника теплового нагружения $q_{изл}$ направлен по нормали к слоям. Поперечные размеры дефекта (диаметр d и толщина δ) ограничены и существенно меньше размера пластин (рис. 2).

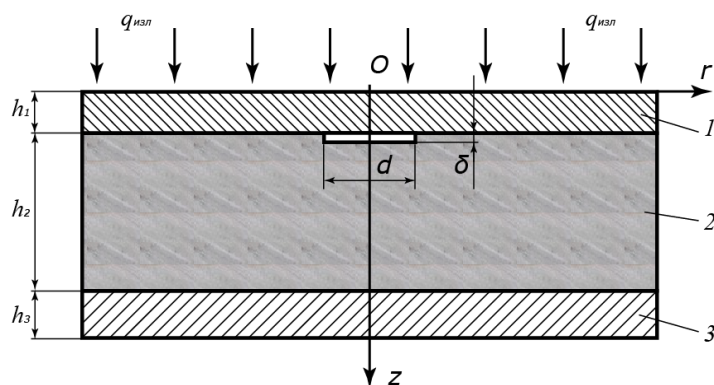


Рис. 2. Трехслойная пластина с цилиндрическим дефектом, ее основные размеры

При моделировании теплового состояния объекта был принят ряд допущений и ограничений.

Для обеспечения возможности определения поперечных размеров дефектов пластина рассматривается как симметричная относительно оси z в цилиндрической системе координат (r, z) . Все слои пластины имеют форму цилиндра радиуса R , причем $R \gg h_i$. Для температурного поля имеет место осевая симметрия ($dT/d\varphi = 0$), считаем, что температурное поле нестационарное и двумерное – $T(r, z, \tau)$.

Процесс нагрева соответствует условиям проведения импульсного активного ТК. Теплообмен со стороны источника теплового нагружения считаем адиабатическим, поскольку в активных процедурах ТК мощность потока нагрева обычно значительно превышает мощность встречного потока теплоотдачи от тела за счет конвекции и излучения.

Отсутствует термическое сопротивление в контакте пластин соседних слоев. Контакт между отдельными слоями пластины полагаем идеальным, то есть на границе раздела выполняется равенство температур и тепловых потоков (граничное условие 4 рода). Передачей тепла в цилиндрическом воздушном зазоре можно пренебречь.

С учетом сформулированных допущений будем полагать, что распределение температуры в исследуемом объекте описывается уравнением теплопроводности ($\tau > 0, 0 \leq r \leq R, 0 \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$) (см. рис. 2)

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = a_i \cdot \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где $i = 1, 2, 3$ – номер слоя; τ – время; $T(r, z, \tau)$ – температура, $a_i = \lambda_i / (c_i \cdot \rho_i)$ – коэффициент температуропроводности; λ_i, ρ_i, c_i – соответственно теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость металлов.

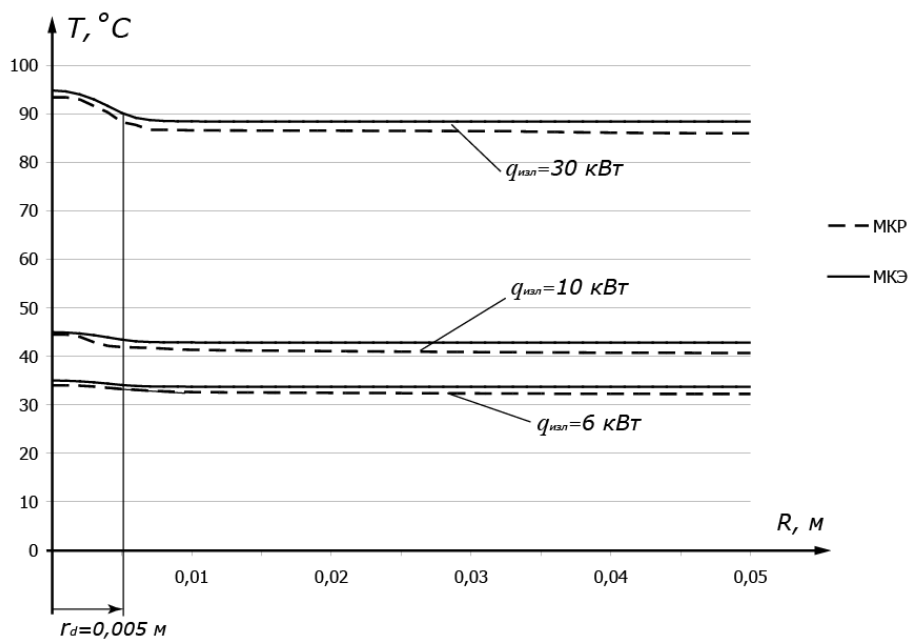
Индекс 1 соответствует стали при $0 \leq z \leq h_1$; индекс 2 – алюминию при $h_1 \leq z \leq (h_1 + h_2)$; индекс 3 – стали при $(h_1 + h_2) \leq z \leq (h_1 + h_2 + h_3)$.

Подробное описание модели импульсного нагрева и последующего остывания многослойной пластины при наличии дефекта расслоения с учетом граничных условий и различных вариантов нагрева и охлаждения (односторонний и двухсторонний тепловой контроль) приведено в [6]. Вследствие нелинейности уравнений и сложных граничных условий получить точное аналитическое решение данной задачи не представляется возможным.

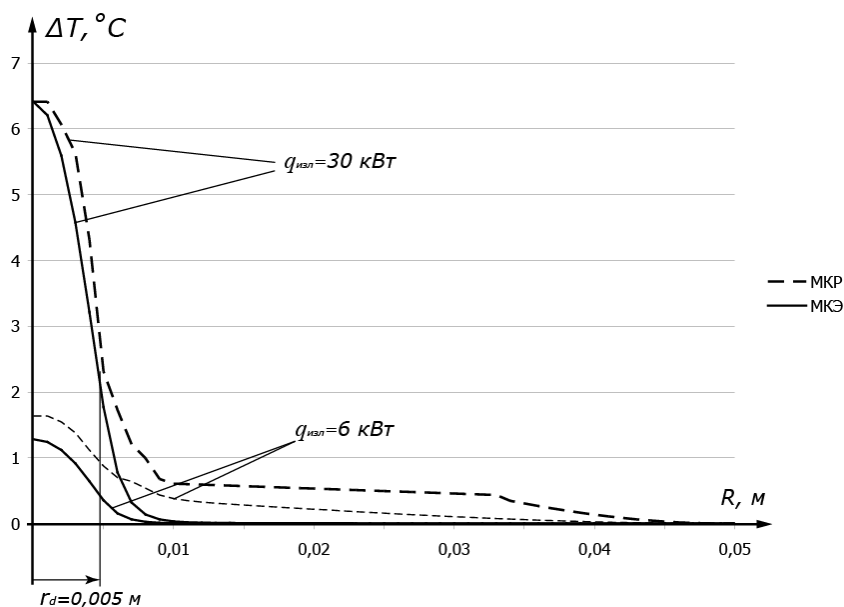
Разработан алгоритм решения методом конечных разностей и его программная реализация для математических пакетов GNU Octave/Matlab [6]. Кроме того, разработана модель и проведен расчет методом конечных

элементов в пакете Agros2D [7]. На рис. 3 приведено сравнение результатов полученных решений.

Видно, что качественная картина распределения температурных полей подобна. Отклонения объясняются точностью решения различными методами и находятся в пределах заявленной производителем погрешности измерения современных распространенных моделей тепловизоров.



а)



б)

Рис. 3. Распределение сигналов по поверхности пластины при нагреве со стороны дефекта: а – температура; б – дифференциальный температурный сигнал

Для определения оптимального времени нагрева пластин построены графики зависимости температурного сигнала над дефектом в центральной точке поверхности пластины от времени (рис. 4).

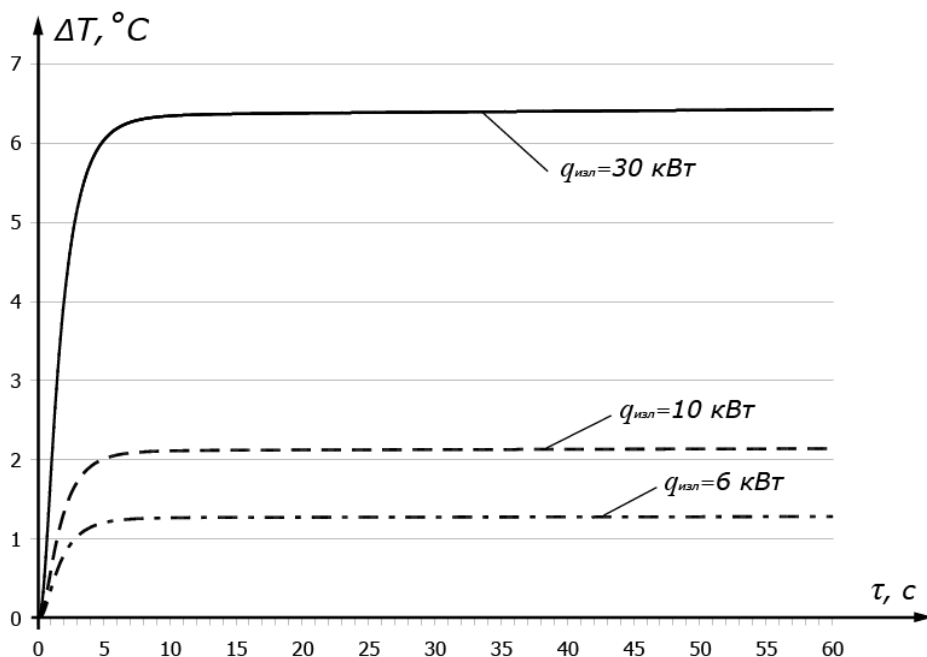


Рис. 4. Зависимость дифференциального температурного сигнала на оси пластины от времени нагрева

Во всех рассмотренных случаях можно определить характерный момент времени, примерно равный 5 с, до наступления которого температурный сигнал устойчиво растет. При дальнейшем нагреве сигнал изменяется на сотые доли градуса, что является пределом чувствительности современных тепловизоров.

Заключение. Результаты проведенного моделирования показывают, что дефекты расслоения между металлами оказывают сопротивление тепловому потоку, поэтому при измерении температуры со стороны источника теплового воздействия над дефектом будет наблюдаться локальное повышение температуры, а при расположении устройств тепловой стимуляции и регистрации температуры с разных сторон пластины – ее снижение. Увеличение мощности тепловой стимуляции способствует росту амплитуды температурного сигнала. Максимальная величина сигнала наблюдается на оси дефекта, по результатам последовательных измерений температуры в центральной точке поверхности пластины над дефектом в ходе нагрева определен характерный момент времени, до наступления которого наблюдается устойчивый рост температурного сигнала.

Численное моделирование различными методами в разных программных пакетах позволило получить качественно подобные

результаты. Наблюдаемые отклонения находятся в пределах погрешности измерений распространенных моделей современных тепловизоров.

Полученные результаты могут быть использованы для дальнейших экспериментальных исследований и при формировании системы активного ТК изделий из многослойных биметаллических материалов.

Библиографический список

1. Кобелев, А.Г. Материаловедение. Технология композиционных материалов / А.Г. Кобелев, М.А. Шаронов, О.А. Кобелев, В.П. Шаронова. – М.: КНОРУС, 2016. – 270 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник. В 2-х книгах. Кн. 1 / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1986. – 488 с.
3. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль: научное издание. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
5. Ячиков И.М., Логунова О.С., Портнова И.В. Математическое моделирование теплофизических процессов. – Магнитогорск, МГТУ, 2004. – 175 с.
6. Логиновский, О.В. Определение параметров дефекта расслоения биметаллической пластины посредством активного теплового неразрушающего контроля / О.В. Логиновский, Л.Ю. Костылева, А.А. Максимов, И.М. Ячиков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 4. – С. 37–51.
7. Костылева, Л.Ю. Моделирование нестационарной теплопередачи в многослойной биметаллической пластине / Л.Ю. Костылева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 68–79.

РЕЛЕЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ТРЕХФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПОСТОЯННОЕ

С.А. Кочетков

В статье рассмотрена задача регулирования выходного напряжения синхронной генераторной установки. Управление осуществляется с помощью ключевого преобразователя мощности, который выполнен на транзисторах и подключен к конденсатору и аккумуляторной батарее. Ставится задача регулирования заданного выходного напряжения. Для этого вычисляются задающие воздействия для токов в обмотках статора генератора с учетом их активного сопротивления и величины внешней нагрузки, которая либо оценивается с помощью наблюдателя состояния. По вычисленным задающим воздействиям в токовом контуре синтезируются управляющие воздействия для ключевого преобразователя.

Ключевые слова: ключевой преобразователь мощности, трехфазная система, генератор переменного тока, релейный закон управления.

Синхронные генераторы широко используются для преобразования энергии из внешней среды [1, 2]. В данной работе исследуется транспортное средство с синхронным генератором на постоянных магнитах (СГПМ). Рассмотрена конструкция генератора с синусоидальной противо-ЭДС (обратной ЭДС) в отличие от бесщеточной машины постоянного тока, которая имеет трапециевидное распределение противо-ЭДС по воздушному зазору генератора [3, 4].

Основными элементами конструкции бортовой системы электроснабжения автомобиля являются генератор, полупроводниковый преобразователь мощности и сглаживающий выходной конденсатор.

Основная цель данной статьи состоит в рассмотрении трехфазного преобразователя переменного тока в постоянный с точки зрения преобразования механической энергии в электрическую. При движении автомобиля внешний крутящий момент двигателя приводит в движение генератор с изменяющимися во времени частотой вращения и потребляемой мощностью. Поэтому алгоритм управления необходимо синтезировать с учетом располагаемой механической мощности, выходного напряжения и тока, а также тепловых потерь в обмотках СГПМ на их активных сопротивлениях. При синтезе алгоритма управления вычисляются требуемые значения в токовом контуре с использованием информации о внешнем крутящем моменте, выходном напряжении и сопротивлении нагрузки, угловой скорости вращения и сопротивлении

обмотки. Эти опорные значения токов используются в обратной связи, обеспечивающей соответствующие управляющие напряжения на основе «вихревого» алгоритма [5]. В установившемся режиме выходное напряжение преобразователя асимптотически стремится к заданному значению. Для гарантии существования решения выводится условие разрешимости поставленной задачи.

На рис. 1 представлена качественная схема бортовой системы электропитания транспортного средства. Управление установкой осуществляется с помощью трехфазного преобразователя мощности, который питается от аккумуляторной батареи с внешним конденсатором C . Генератор имеет три обмотки A, B, C , соединенные по схеме «звезда». Предполагается, что все обмотки одинаковы и симметричны друг относительно друга. Положительное направление токов и напряжений показано соответствующими стрелками.

Преобразователь мощности управляется сигналами u_{iH}, u_{iL} ($i = \overline{1,3}$), имеющими два устойчивых состояния $\{0, 1\}$, а управляющие входы u_{iH}, u_{iL} с одной ветви преобразователя всегда находятся в противоположном состоянии

$$u_{iL} = 1 - u_{iH}, i = \overline{1,3}. \quad (1)$$

Фазные напряжения рассчитываются по формулам

$$\begin{pmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{pmatrix} = \frac{u_0}{6} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где входы управления $u_i = 2u_{iH} - 1$ ($i = \overline{1,3}$) принимают дискретные значения $\{-1, 1\}$, u_0 – напряжение конденсатора или напряжение батареи, u_A, u_B, u_C – фазные напряжения.

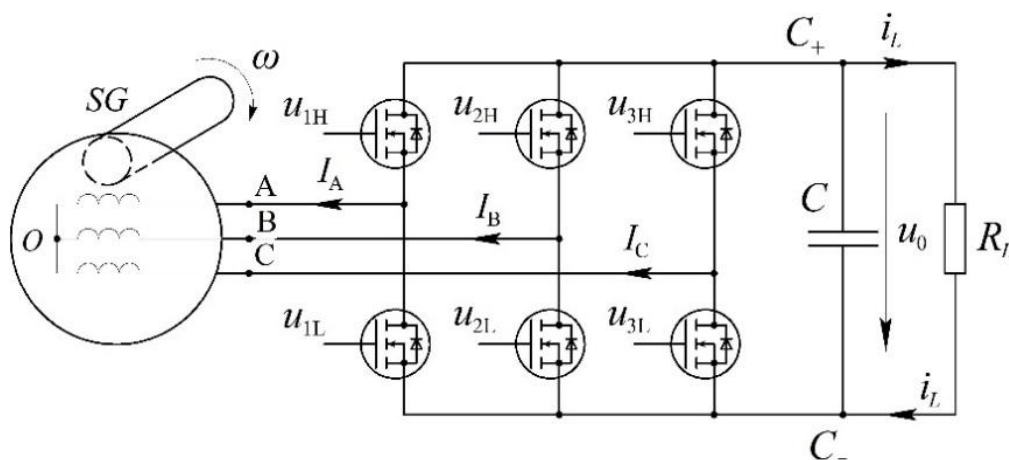


Рис. 1. Схема генераторной установки

Дифференциальные уравнения для рассматриваемого объекта можно записать в (d_q) -координатной системе, связанной с вращающимся ротором, в виде [2]

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{1}{J} \left[\frac{3}{2} p \psi_r I_q + M_g \right], \\ \frac{du_0}{dt} &= -\frac{u_0}{R_L C} - \frac{3(I_d u_{ud} + I_q u_{uq})}{4C}, \\ \dot{I}_d &= -\frac{R_s}{L_s} I_d + p \omega I_q + \frac{u_0}{2} \frac{u_{ud}}{L_s}, \\ \dot{I}_q &= -\frac{R_s}{L_s} I_q - p \omega I_d - \frac{p \omega}{L_s} \psi_r + \frac{u_0}{2} \frac{u_{uq}}{L_s},\end{aligned}\tag{3}$$

где p – число пар полюсов, R_L – эквивалентное сопротивление нагрузки-аккумулятора, C – емкость конденсатора, u_0/R_L – ток нагрузки, R_L считается постоянным

$$\dot{R}_L = 0,\tag{4}$$

L_s – эквивалентная индуктивность статора, ψ_r – постоянный магнитный поток ротора, ω – угловая скорость ротора, $M_g > 0$ – внешний крутящий момент генератора, I_d, I_q – компоненты вектора тока, u_{ud}, u_{uq} – компоненты вектора управления, которые вычисляются согласно выражениям

$$\begin{pmatrix} u_{ud} \\ u_{uq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{pmatrix} (u_1 \ u_2 \ u_3)^T,$$

где $\gamma = p\varphi$ – электрический угол, $\sqrt{u_{ud}^2 + u_{uq}^2} = 4/3$ в соответствии с (1)–(2).

Предполагается, что параметры R_s, L_s, C, J, R_L известны, а переменные $\omega, u_0, \psi_r, I_d, I_q$ доступны измерению, режим движения транспортного средства такой, что

$$M_g = \text{const} > 0.\tag{5}$$

Ставится задача регулирования напряжения аккумуляторной батареи

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |u_0 - u_0^*| = 0,\tag{6}$$

где $u_0^* = \text{const} > 0$ – желаемый уровень заряда батареи или напряжения конденсатора.

Для синтеза закона управления, во-первых, необходимо извлечь

информацию о крутящем моменте внешнего генератора. Это можно сделать с помощью наблюдателя крутящего момента.

Уравнения наблюдателя можно выбрать в виде

$$\begin{aligned}\dot{\hat{M}}_g &= l_1(\omega - \hat{\omega}), \\ \dot{\hat{\omega}} &= \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p \psi_r I_q + \hat{M}_g \right) + l_2(\omega - \hat{\omega}),\end{aligned}$$

где \hat{M} – оценка внешнего крутящего момента, $\hat{\omega}$ – оценка угловой скорости, $l_i = \text{const} > 0 (i = \overline{1,2})$ – коэффициенты обратной связи наблюдателя, коэффициенты l_i выбраны так, что $l_2^2 - (4/J)l_1 > 0$.

Согласно (3)–(4) можно вывести соотношения для ошибок оценивания

$$\begin{aligned}\dot{\bar{M}}_g &= -l_1 \bar{\omega}, & \dot{\bar{\omega}} &= \frac{\bar{M}_g}{J} - l_2 \bar{\omega},\end{aligned}\quad (7)$$

где $\bar{M}_g = M_g - \hat{M}_g$, $\bar{\omega} = \omega - \hat{\omega}$.

Характеристическое уравнение системы (7)

$$\lambda^2 + l_2 \lambda + \frac{l_1}{J} = 0,$$

и с помощью его корней

$$\lambda_1 = \frac{-l_2 + \sqrt{l_2^2 - (4/J)l_1}}{2}, \quad \lambda_2 = \frac{-l_2 - \sqrt{l_2^2 - (4/J)l_1}}{2}$$

назначаются темпы сходимости оценок внешнего момента \hat{M}_g к истинному значению M_g .

Уравнения объекта (3) можно рассматривать как две подсистемы. Медленная подсистема соответствует механической переменной ω , а токовый контур статора – быстрой. В статье с учетом (4)–(5) рассмотрен частный случай движения автомобиля с постоянным крутящим моментом внешнего генератора. Следовательно, стационарное решение для компонентов вектора потока ротора, вектора тока статора и вектора управления также является постоянным. Цель состоит в том, чтобы найти это решение в соответствии с моделью объекта (3) и использовать его для управления с обратной связью в токовом контуре быстрого движения для приближения реальных значений тока к желаемым. Далее стационарные решения для пространственного вектора состояния системы (3) отмечены символом «*».

Для обеспечения постоянной скорости вращения правая часть первого уравнения (3) должна быть равна нулю. Поэтому компоненты вектора тока статора должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить постоянный отрицательный момент согласно (5). Известно [2, 6], что момент синхронной машины в генераторном режиме отрицателен, и

составляющая I_q тоже отрицательна

$$I_q^* = -|I_q^*| = \text{const} < 0, I_d^* = \text{const} > 0. \quad (8)$$

Введем в рассмотрение ошибки регулирования

$$\bar{I}_q = I_q - I_q^*, \bar{I}_d = I_d - I_d^* \quad (9)$$

и продифференцируем их в соответствии с системой (3):

$$\begin{aligned} \dot{\bar{I}}_d &= -\frac{R_s}{L_s} I_d + p\omega I_q + \frac{u_0}{2} \frac{u_{ud}}{L_s}, \\ \dot{\bar{I}}_q &= -\frac{R_s}{L_s} I_q - p\omega I_d - \frac{p\omega}{L_s} \psi_r + \frac{u_0}{2} \frac{u_{uq}}{L_s}. \end{aligned}$$

Управляющие напряжения u_{ud}, u_{uq} выбираются из условия экспоненциальной сходимости переменных \bar{I}_d, \bar{I}_q к нулю на основе «вихревого» алгоритма

$$\begin{aligned} \frac{u_0}{2} \frac{u_{ud}}{L_s} = v_d, \dot{v}_d &= -\text{sat}_d(\alpha_d v_d) - M_{2d} \text{sign}(\bar{I}_d); \\ \frac{u_0}{2} \frac{u_{uq}}{L_s} = v_q, \dot{v}_q &= -\text{sat}_q(\alpha_q v_q) - M_{2q} \text{sign}(\bar{I}_q), \end{aligned} \quad (10)$$

где $\text{sign}(\cdot)$ – функция знака, $\text{sat}(\cdot)$ – функция насыщения.

$$\text{sat}_j(x) = \begin{cases} M_{1j}, & x \geq 1; \\ x, & -1 < x < 1; \\ -M_{1j}, & x \leq -1, \end{cases} \quad j = \{d, q\}$$

$$M_{id} = \text{const} > 0, M_{iq} = \text{const} > 0 (i = \overline{1,2}), \alpha_d = \text{const} > 0, \alpha_q = \text{const} > 0,$$

Уравнения замкнутой системы для внутреннего контура тока

$$\begin{aligned} \dot{\bar{I}}_d &= -\frac{R_s}{L_s} I_d + p\omega I_q + v_d, \quad \dot{v}_d = -M_{1d} \text{sat}(v) - M_{2d} \text{sign}(\bar{I}_d); \\ \dot{\bar{I}}_q &= -\frac{R_s}{L_s} I_q - p\omega I_d - \frac{p\omega}{L_s} \psi_r + v_q, \quad \dot{v}_q = -M_{1q} \text{sat}(v) - M_{2q} \text{sign}(\bar{I}_q). \end{aligned}$$

При соответствующем выборе коэффициентов обратной связи в (10) обеспечиваются предельные соотношения [5]

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} |\bar{I}_d| = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} v_d &= \frac{R_s}{L_s} I_d - p\omega I_q; \\ \lim_{t \rightarrow \infty} |\bar{I}_q| = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} v_q &= \frac{R_s}{L_s} I_q + p\omega I_d + \frac{p\omega}{L_s} \psi_r. \end{aligned} \quad (11)$$

Чтобы обеспечить постоянную скорость вращения, эталонное значение вычисляется следующим образом

$$|I_q^*| = \frac{2M_g}{3p\psi_r}. \quad (12)$$

Подстановка (8), (12) в уравнения компонент вектора тока статора из (3) с учетом (10)–(11) приводит к соотношениям

$$\begin{aligned} u_{ud}^* &= \frac{2R_s I_d^*}{u_0} + \frac{4L_s \omega^* \hat{M}_g}{3\psi_r u_0}, \\ u_{uq}^* &= \frac{2p\omega^* L_s I_d^*}{u_0} - \frac{4R_s \hat{M}_g}{3p\psi_r u_0} + \frac{2p\omega^* \psi_r}{u_0}. \end{aligned} \quad (13)$$

Желаемые значения компонент вектора тока статора выбираются из соотношения

$$-\frac{3(I_d^* u_{ud}^* + I_q^* u_{uq}^*)}{4} = \frac{(u_0^*)^2}{u_0 R_L}, \quad (14)$$

чтобы обеспечить закон изменения выходного напряжения согласно уравнению

$$\frac{du_0}{dt} = \frac{u_0}{R_L C} \left(-1 + \frac{(u_0^*)^2}{u_0^2} \right),$$

решение, которого в пределе

$$\lim_{t \rightarrow \infty} u_0(t) = u_0^*,$$

что и требуется обеспечить согласно (6).

Из (13)–(14) получается квадратное уравнение

$$(I_d^*)^2 + \frac{4}{9} \frac{\hat{M}_g^2}{p^2 \psi_r^2} - \frac{2}{3} \frac{\hat{M}_g \omega^*}{R_s} + \frac{2(u_0^*)^2}{3R_L R_s} = 0.$$

Его положительное решение

$$I_d^* = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\hat{M}_g \omega^*}{R_s} - \frac{4}{9} \frac{\hat{M}_g^2}{p^2 \psi_r^2} - \frac{2(u_0^*)^2}{3R_L R_s}}, \quad (15)$$

используется в обратной связи по току согласно (9)–(10).

С учетом (15) можно вывести условие разрешимости поставленной задачи

$$M_g \omega^* - \frac{2}{3} \frac{\hat{M}_g^2 R_s}{p^2 \psi_r^2} - \frac{(u_0^*)^2}{R_L} > 0.$$

Последнее неравенство можно записать в виде двух соотношений

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega^* > \frac{8 (u_0^*)^2 R_s}{3 p^2 \psi_r^2 R_L}, D = (\omega^*)^2 - \frac{8 (u_0^*)^2 R_s}{3 p^2 \psi_r^2 R_L}; \\ M_g \in \left(\frac{3 p^2 \psi_r^2}{2 R_s} [\omega^* - \sqrt{D}], \frac{3 p^2 \psi_r^2}{2 R_s} [\omega^* + \sqrt{D}] \right). \end{array} \right.$$

Заключение. Рассмотрена задача регулирования выходного напряжения синхронного генератора в автомобильной установке. В соответствии с постоянным установившимся решением требуемые выходные токи обратной связи были рассчитаны для конкретного случая с постоянным внешним крутящим моментом и скоростью вращения. Ситуацию с переменной нагрузкой и произвольными условиями движения автомобиля необходимо рассмотреть более детально в дальнейших исследованиях.

Библиографический список

1. Langdorf, A. Theory of Alternating-Current Machinery / A. Langdorf. – New York: McGraw-Hill, Second Edition, 1955. – 666 p.
2. Leonhard, W. Control of Electrical Drives / W. Leonhard. – Berlin: Springer-Verlag, 1990. – 420 p.
3. Krishnan, R. Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives / R. Krishnan. – New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2010. – 611 p.
4. Hendershot, J.R.T. Design of Brushless Permanent-Magnet Machines / J.R.T Hendershot, J.E. Miller. – Florida: Motor Design Books LLC, 2010. – 798 p.
5. Kochetkov, S.A. Invariance in Systems with Unmatched Perturbations / S.A. Kochetkov, V.A. Utkin // Autom. Remote Control. – 2013. – Vol. 74, No. 7. – P. 1097–1127.
6. Utkin, V.I. Sliding Mode Control in Electromechanical Systems / V.I. Utkin, J. Guldner, J. Shi. – London: Tailor and Francis, 2009. – 486 p.

КАЛИБРОВКА ТРЕХОСНОГО МАГНИТОМЕТРА С ПРИВЯЗКОЙ К ОСЯМ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

П.Ю. Кузнецов

Приведен вариант калибровки трехосного магнитометра, когда измерительные оси магнитометра приводятся к измерительным осям акселерометров бескарданной инерциальной навигационной системы.

Ключевые слова: магнитометр, бескарданная инерциальная навигационная система, калибровка, среднее глобальное магнитное поле Земли.

С приходом в обыденную жизнь беспилотных аппаратов воздушного, наземного, морского и подводного типов, возросла необходимость в системах, способных автономно определять параметры ориентации. Одним из возможных вариантов решения данной проблемы являются приборы, основанные на инерциальных датчиках и магнитометрах [1].

Важным этапом подготовки данных систем к использованию является калибровка. От ее качества напрямую зависит точность получаемого решения. В составе бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС) находятся датчики угловой скорости (ДУС) и акселерометры. Они проходят этап калибровки при изготовлении. Этого достаточно для стабильной и точной работы алгоритмов, основанных на измерениях инерциальных систем. Калибровка магнитометров носит более сложный характер [2]. Помимо заводской калибровки, которую можно провести при помощи приборов, создающих эталонное магнитное поле, необходимо компенсировать влияние объекта, на который установлен магнитометр. Достаточно очевидно, что если объект установки – это, например, самолет, то для калибровки приходится использовать только знания о магнитном поле земли. Это связано с тем, что поместить самолет внутрь систем, создающих эталонное воздействие, не представляется возможным.

Магнитные массы объекта вносят существенные искажения в показания магнитометров, поэтому пренебрегать калибровкой после установки на объект нельзя [3]. Также показания магнитометров ухудшаются со временем. Это связано как с их несовершенством, так и с тем, что объект может быть намагничен внешними магнитными полями. Все это говорит о том, что калибровка магнитометров – это повторяющаяся процедура в течение жизни прибора.

Модель измерений магнитометров. Реальные измерения магнитометров сопровождаются ошибками различного рода:

- мягкие искажения (мультипликативные масштабные коэффициенты и перекосы осей чувствительности);
- жесткие искажения (аддитивный вектор смещения нуля);
- вихревое намагничивание (ошибки, порождаемые угловым движением прибора);
- температурная зависимость перечисленных выше параметров;
- случайный шум различного рода.

Все эти ошибки необходимо правильно компенсировать. В данной работе не будет рассматриваться температурная зависимость и вихревое намагничивание. В таком случае, справедлива следующая математическая модель измерений:

$$H_z^{ANOM} + H_z^{IGRF} = H_z = A_H(E + S_H)(H' + \Delta H) + \delta_H, \quad (1)$$

где H_z^{ANOM} – вектор аномального магнитного поля в осях акселерометров, H_z^{IGRF} – вектор стационарного магнитного поля в осях акселерометров, посчитанный, например, на основании международной модели среднего глобального магнитного поля земли IGRF [6], H_z – откалиброванные значения измеренного вектора магнитной индукции в осях акселерометров; A_H – матрица поворота измерительных осей трехосного магнитометра к измерительным осям акселерометров; E – единичная матрица; S_H – верхне-треугольная матрица масштабных коэффициентов, перекосов осей чувствительности, мягкого намагничивания; H' – вектор исходных показаний магнитометров; ΔH – вектор смещения нуля и жесткого намагничивания; δ_H – вектор случайного шума различной природы.

Для решения задачи калибровки привлекается информация о географических координатах места проведения испытаний, а также точная дата. На основании этих данных строятся параметры стационарного магнитного поля земли и используются в алгоритме калибровки.

Калибровка магнитометров. Калибровку можно разделить на два этапа. Первый этап – это калибровка блока магнитометров автономно, не привлекая дополнительную информацию инерциальной системы. Данному варианту посвящено множество различных работ [4]. Основная идея заключается в оценивании шести коэффициентов верхне-треугольной матрицы мягкого намагничивания и трех коэффициентов вектора жесткого намагничивания. Оценка строится на основании того, что модуль магнитного поля земли в точке испытаний является постоянным. Задача сводится к определению параметров эллипсоида, коэффициенты которого являются комбинациями калибровочных параметров магнитометра.

Второй этап – привязка к осям акселерометров. Достаточно очевидно, что после калибровки первого этапа, измерительные оси магнитометров не совпадают с измерительными осями акселерометров. Углы несоосности могут достигать значений нескольких градусов. Данному этапу калибровки

также посвящено большое количество работ, например, [5]. Основная идея – это определение компонент матрицы поворота A_H , которая связывает показания магнитометров H_M в собственных осях и показания в осях акселерометров H_Z по формуле

$$H_Z = A_H H_M. \quad (2)$$

Калибровка с привязкой к измерительным осям акселерометров. Описанные выше два этапа можно объединить в один, причем решать задачу не в постобработке, а в реальном времени.

Легко видеть, что модель (1) не является линейной. Также, откалиброванные значения магнитометров H_Z включают в себя два вектора – вектор нормального, или стационарного, магнитного поля H_Z^{IGRF} , и вектора аномального магнитного поля H_Z^{ANOM} . В дальнейшем будем пренебрегать наличием аномального магнитного поля, а также градиента магнитного поля, тем самым считая, что вектор стационарного магнитного H_Z^{IGRF} поля является постоянным.

Все калибровочные параметры являются малыми, поэтому оправданным будет переход к линейной модели для упрощения задачи оценивания:

$$H_Z = (E + S)H' + \Delta H + \delta_H, \quad (3)$$

где $H_Z, E, H', \Delta H, \delta_H$ имеют тот же смысл, что и в уравнении (1), S – матрица размерности три на три, имеющая девять независимых компонент, объединяющих в себе смысл линеаризации уравнения (1) и объединения матрицы поворота A_H и верхне-треугольной матрицы мягкого намагничивания S_H .

Рассмотрим вектор нормали n_z к поверхности земли в проекции на измерительные оси акселерометров. Пусть f_z – вектор показаний акселерометров. Тогда

$$n_z = \frac{f_z}{\|f_z\|}, \quad (4)$$

которая справедлива только в случае отсутствия линейных передвижения объекта. При наличии ускорений, отличных от ускорения свободного падения, вектор нормали n_z будет искажен. Для компенсации данных возмущений используется алгоритм объединения показаний ДУС и акселерометров БИНС, дающий невозмущенные оценки углов крена и тангажа, на основании которых строится точное значение вектора нормали n_z по формуле

$$n_z = A_{zx}(\vartheta, \gamma)n_x, \quad n_x = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $A_{zx}(\vartheta, \gamma)$ – матрица перехода из географической системы координат к приборной (оси акселерометров), ϑ – угол тангажа, γ – угол крена, n_x – вектор нормали в географической системе координат ([1]).

Скалярное произведение вектора нормали и вектора магнитной индукции в осях акселерометров включает в себя все калибровочные параметры модели (3) и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 (n_z, H_z) &= \|H_z\| \cos\left(\frac{\pi}{2} + dip\right) = \\
 &= (1 + s_{11})n_{z_1}H'_1 + s_{12}n_{z_1}H'_2 + s_{13}n_{z_1}H'_3 + \Delta H_1n_{z_1} + \\
 &+ s_{21}n_{z_2}H'_1 + (1 + s_{22})n_{z_2}H'_2 + s_{23}n_{z_2}H'_3 + \Delta H_2n_{z_2} + \\
 &+ s_{31}n_{z_3}H'_1 + s_{33}n_{z_3}H'_2 + (1 + s_{33})n_{z_3}H'_3 + \Delta H_3n_{z_3},
 \end{aligned} \quad (6)$$

где dip – угол наклона вектора магнитной индукции к горизонту, посчитанный на основании модели IGRF, s_{ij} – элементы матрицы S из уравнения (3), n_{z_i} – компоненты вектора нормали, H'_i – компоненты исходного вектора магнитной индукции, ΔH_i – компоненты вектора смещения нуля из уравнения (3) ($i, j = 1, 2, 3$).

Далее, задача сводится к статической задаче оценивания методом наименьших квадратов (МНК):

$$z = Hx + r, \quad \tilde{x} = (H^T H)^{-1} H^T z, \quad (7)$$

где z – вектор измерений, H – матрица наблюдения, посчитанная на основании уравнения (6), x – вектор, подлежащий оцениванию, r – не коррелированный во времени вектор с нулевым математическим ожиданием и постоянной интенсивностью, \tilde{x} – оценка вектора x .

Для задач реального времени оценка МНК строится рекуррентно, позволяя уточнять оценку вектора \tilde{x} с приходом новых измерений инерциальных датчиков и магнитометров.

Вектор оцениваемых параметров модели (3) выглядит следующим образом:

$$x = (s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{21}, s_{22}, s_{23}, s_{31}, s_{32}, s_{33}, \Delta H_1, \Delta H_2, \Delta H_3). \quad (8)$$

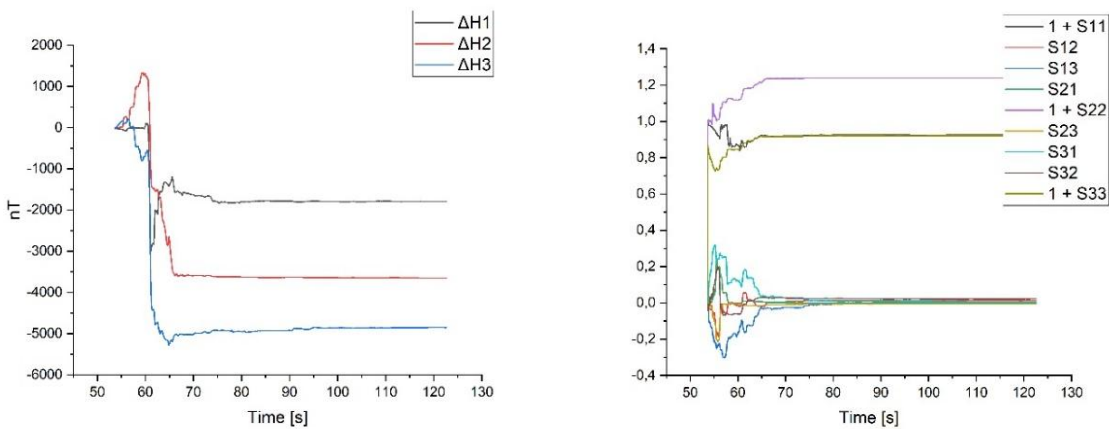


Рис. 1. Оценка калибровочных параметров

Результаты. Обработка имитационных данных показала наличие наблюдаемости всех калибровочных параметров на основе модели (3) и наблюдения (6).

Пример рекуррентного оценивания калибровочных параметров приведен на рис. 1. Эксперимент длился чуть более минуты и состоял из последовательных вращений датчика во всевозможных направлениях.

На рис. 2 изображен модуль вектора некалиброванных измерений магнитометра H' и калиброванных измерений H_z в том же эксперименте, что и на рисунке 1. Видно, что калиброванные измерения находятся на одном уровне, независимо от ориентации объекта, в отличие от некалиброванных измерений, претерпевающих значительные изменения.

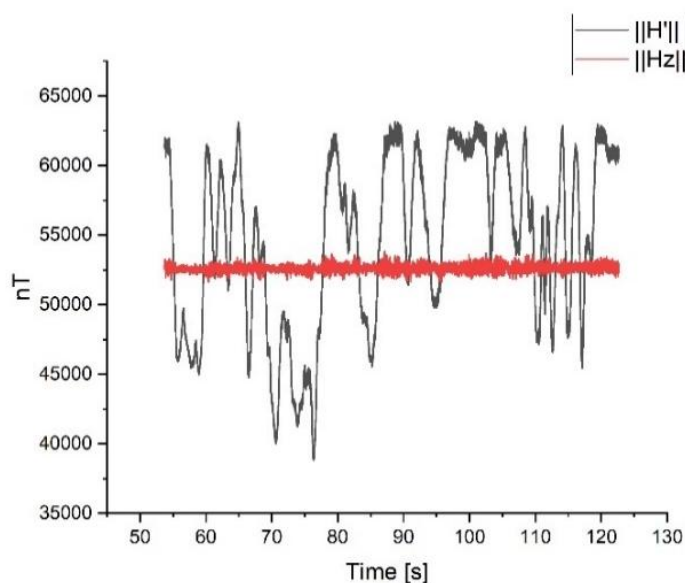


Рис. 2. Модуль вектора калиброванных и некалиброванных измерений магнитометра

Заключение. Рассмотрена задача калибровки блока магнитометров с привязкой к осям акселерометров. Численно показана наблюдаемость всех калибровочных параметров модели. Приведены результаты обработки экспериментальных данных.

Библиографический список

1. Голован, А.А. Математические основы навигационных систем. Часть I. Математические модели инерциальной навигации. 3-е изд., испр. и доп. / А.А. Голован, Н.А. Парусников. – М.: Изд-во МГУ, 2011.
2. Каршаков, Е.В. Задача калибровки электромагнитной системы относительного позиционирования / Е.В. Каршаков // Управление большими системами. – 2012. – Вып. 37. – С. 250–268.
3. Каршаков, Е.В. Стохастическая задача оценивания при компенсации девиации аэромагнитометра / Е.В. Каршаков, М.В. Харичкин // Автоматика и телемеханика. – 2008. – С. 68-77.

4. Vasconcelos, J. F. A Geometric Approach to Strapdown Magnetometer Calibration in Sensor Frame / J.F. Vasconcelos, G. Elkaim, C. Silvestre, P. Oliveira, B. Cardeira // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2011. Vol. 47, Iss. 2. – P. 1293–1306.
5. Li, Z. A Calibration Method for Magnetic Sensors and Accelerometer in Tilt-compensated Digital Compass / Z. Li, X. Li, Y. Wang // Electronic Measurement & Instruments, ICEMI 2009, 9th International Conference. – P. 2-868–2-871.
6. Thébault, E. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation / E. Thébault et al. // Earth, Planets and Space. – 2015. – Vol. 67, No. 79.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ

О. Д. Куприков, Д.В. Команич

В работе приводится анализ особенностей и характеристик гидроакустического канала. Представлена модель гидроакустического канала, имитирующая воздействие водной среды на передаваемые сигналы. Гидроакустические каналы существенно уступают по характеристикам радиочастотным наземным каналам, поэтому передача высокоскоростного трафика в водной среде является очень сложной и актуальной задачей. В данной работе проведена оценка возможности использования среднего частотного диапазона акустических волн для передачи высокоскоростного трафика. С этой целью был рассмотрен канал с типовыми для задачи связи с телеуправляемым автономным необитаемым аппаратом сверхлегкого класса в водных акваториях. Решается задача моделирования в среде Matlab/Simulink высокоскоростного гидроакустического канала.

Ключевые слова: подводная связь, гидроакустика, гидроакустический канал связи, эффект Доплера, импульсная характеристика, Matlab, Simulink.

Введение. Проблема изучения подводного пространства и дна морей и океанов нашей планеты уже в течение многих столетий привлекает ученых со всего мира. Подводная связь играет огромную роль в развитии передачи информации, но при этом не получила должного развития [1]. Применение исключительно проводных подводных систем связи ограничивает возможную дальность действия и мобильность таких подводных аппаратов как телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (ТНПА) или автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА).

Создание эффективных беспроводных подводных систем передачи данных до сих пор является серьезной проблемой в научной сфере. Это связано с серьезными отличиями между воздушной и водной средой. Основным фактором явилась сильная нестационарность водной среды. Также, вода является проводящей средой, что приводит к сильному затуханию сигнала в толще воды.

Анализ актуального состояния и перспективных направлений развития беспроводных технологий связи с подводными объектами представлен в [5]. Существующие и перспективные применения средств связи под водой, основные физические каналы связи, использующиеся для беспроводной подводной связи (гидроакустический, оптический и радио), в том числе

доступные на рынке коммерческие технологии беспроводной подводной связи и передовые научные разработки также изложены в [5, 6]. Сетевым подводным технологиям посвящены работы [7, 8]. Для построения полнофункциональной мобильной сети в водной среде необходимо развитие сетевых подводных технологий, создание и интеграция подводных подвижных объектов на основе гидроакустических модемов и гидроакустического канала связи [9, 10].

Характеристики гидроакустического канала. Гидроакустический способ передачи представляет собой прием и передачу звуковых волн в водной среде [1]. Данный метод беспроводной передачи информации явился наиболее приемлемым и применимым для поставленных задач, но при этом обладает особыми параметрами и характеристиками.

В отличие от наземных радиоканалов гидроакустический канал связи не может обеспечить сравнимую надежность и скорость передачи данных, что связано с некоторыми его характеристиками. В качестве рабочих частот для исследования характеристик и моделирования гидроакустического канала информации используется частотный диапазон от 20 до 100 кГц. В данном случае на сигнал не оказывают влияние сторонние шумы турбулентности среды и шумы от перемещений водных объектов.

Одной из основных характеристик, исследуемой при моделировании канала связи является скорость распространения акустической волны в водной среде. Таким образом, скорость акустического распространения в среде может быть описана по формуле

$$V = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (1)$$

где K – модуль всестороннего сжатия; ρ – плотность вещества.

Следующая характеристика – задержка передачи сигнала по времени в зависимости от расстояния между приемником и передатчиком и возможной скоростью сигнала. Данный параметр может меняться в зависимости от температуры воды и глубины, на которой осуществляется передача сигнала:

$$T = \frac{S}{V}, \quad (2)$$

где S – расстояние передачи; V – скорость передачи.

Затухание сигнала оказывает наибольшее влияние в гидроакустическом канале связи. Уравнение Франсуа-Гаррисона позволяет рассчитать затухание передаваемого сигнала в условиях морской воды с возможностью учесть температуру среды, наличие в ее составе солей, щелочей и карбонатов, а также глубину, на которой осуществляется передача. Полученные отношения описываются формулой

$$a(f) = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f_1^2 f^2} + \frac{A_2 P_2 f^2}{f_2^2 f^2} + A_3 P_3 f, \quad (3)$$

где A – коэффициент, зависящий от водородного показателя среды; P – коэффициент, зависящий от глубины расположения оборудования; f – частота полосы пропускания; $f_{1,2}$ – частоты релаксации.

Эффект Доплера – это эффект, возникающий вследствие изменения положения источника колебаний в пространстве в ходе которого происходит изменение частоты колебания. Так как водная среда относится к среде с дисперсией, где форма сигнала может изменяться в зависимости от взаимного расположения приемника и передатчика сигнала, а также от состояния среды в разные моменты времени, данный эффект в гидроакустическом канале проявляется как неравенство частот сигнала при его передаче и приеме этого же сигнала в связи с влиянием среды.

На передаваемый сигнал также оказывают воздействие шумы различного происхождения, которые вносят искажения в форму сигнала, которые ухудшают качество самого сигнала и уменьшают возможную дальность передачи. В случае с передачей по гидроакустическому каналу к внешним воздействиям, вносящим в канал помехи, можно отнести шумы отражения акустической волны от подводных объектов и поверхности дна, а также шумы нестатичности водной поверхности, связанные с воздействием погодных условий, которые в большей степени оказывают влияние на сигналы в среднем частотном диапазоне. Шумы нестатичности поверхности воды описываются следующим уравнением:

$$10 \log N_s(f) = 50 + 7,5 \sqrt{v_w} + 20 \log(f) - 40 \log(f + 0,4), \quad (4)$$

где f – частота несущего колебания сигнала; v_w – скорость ветра на поверхности воды.

В ходе исследования основных факторов, влияющих на характеристики гидроакустического канала связи, было выявлено влияние межсимвольной интерференции на передаваемый сигнал. Данный эффект имеет разные варианты происхождения.

В первом случае интерференция между символами передаваемой последовательности возникает из-за отклика приемника на предыдущий символ и невозможности пересечь уровень среза при смене символа. Проявляется этот тип интерференции при передаче последовательности, в которой один символ находится после серии символов противоположного значения. Второй случай явления межсимвольной интерференции возникает в следствие многолучевого распространения, которое связано с тем, что один и тот же сигнал поступает на принимающее оборудование в разные моменты времени, так как волны разных траекторий проходят различные расстояния, имея при этом одинаковую скорость

распространения. Суть межсимвольной интерференции вследствие многолучевого распространения заключается в искажении принимаемой последовательности, связанной с наложением, поступивших в разные моменты времени, волн друг на друга.

Моделирование гидроакустического канала связи. Основной задачей исследования явилось создание модели гидроакустического канала, учитывающей характеристики водной среды, которые оказывают наиболее значимое влияние на передаваемый сигнал. На рис. 1 представлена обобщенная функциональная схема модели гидроакустического канала.

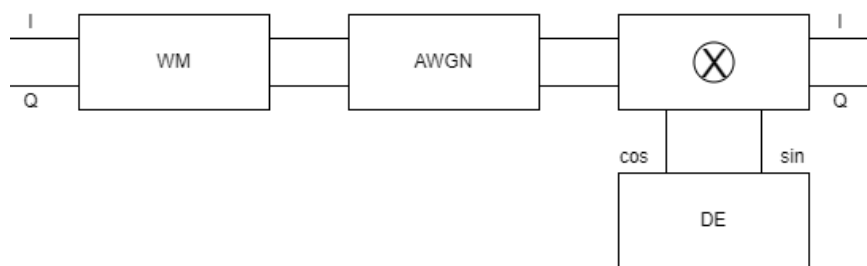


Рис. 1. Функциональная схема гидроакустического канала

Первый блок WM – блок имитации импульсной характеристики гидроакустического канала (БИИХГК), который имитирует влияние водной среды. В качестве основы была выбрана технология WATERMARK – underwater acoustic channel replay benchmark. Данная технология представляет собой набор значений импульсных характеристик, представляющих собой реальные значения откликов водной среды при различных условиях. При реализации гидроакустического канала в требуемых условиях был выбран набор откликов ВСН1, как наиболее подходящего по параметрам.

При создании модели БИИХГК была разработана модель КИХ-фильтра с изменяемым порядком. Таким образом полученная модель вносит в сигнал искажения, аналогичные передачи в водной среде. Модель данного блока представлена на рис. 2.

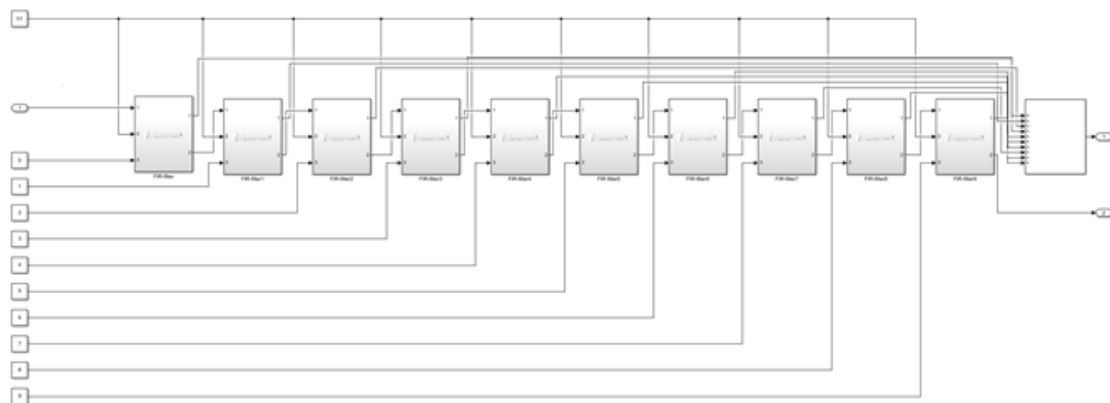


Рис. 2. Реализация БИИХГК в среде Simulink

Следующим блоком модели гидроакустического канала является блок AWGN (additive white Gaussian noise) – добавочный белый гауссовский шум. Данный блок используется в качестве внесения дополнительных шумов, имитирующие общие шумы канала. Данный блок вносит равномерный шум, распространяющийся на всех частотах с однородным показателем мощности.

Последние два элемента функциональной схемы на рис. 1 образуют блок имитации доплеровского эффекта (БИДЭ) в гидроакустическом канале и выполняют операции в области комплексных чисел. Блок DE содержит в себе косинусоидальный и синусоидальный сигналы с определенными значениями амплитуды и частоты, которые подаются на блок множителя. Реализация модели БИДЭ в среде SIMULINK представлена на рис. 3.

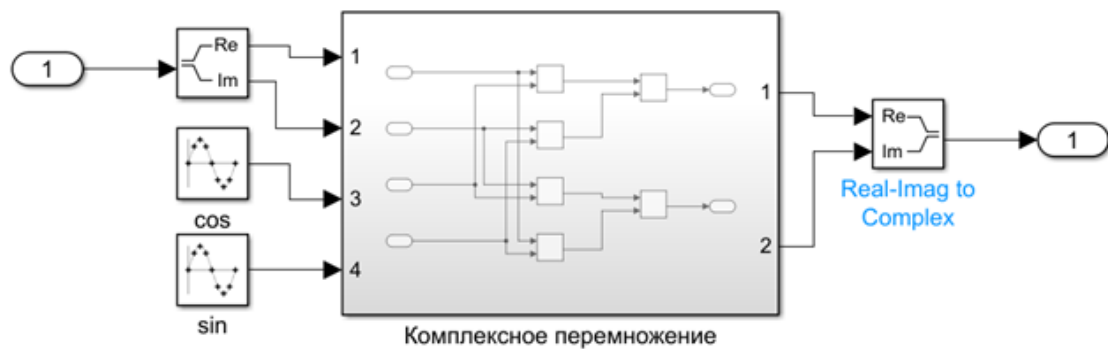


Рис. 3. Реализация БИДЭ в среде Simulink

Комплексный сигнал, поступивший на вход 1, разделяется на действительную и мнимую части для выполнения операции перемножения. Блоки *cos* и *sin* содержат в себе синусоиды. Блок комплексного перемножения выполняет преобразование сигнала, после чего обратно формируется комплексный сигнал.

Анализ и оценка полученных показателей. Проверка работоспособности разработанной модели гидроакустического канала заключается в проверке блоков модели. Для проверки на вход блока имитации импульсной характеристики гидроакустического канал (БИИХГК) подается двоичная последовательность из блока генератора случайной последовательности и сравниваются графики изначального и полученного сигнала. На рис. 4 представлены сравнительные графики до и после прохождения сигналом через БИИХГК. На данном графике изображен сигнал на выходе генератора случайной последовательности и комплексный сигнал, полученный после блока, который искажается с помощью КИХ-фильтра 100-го порядка с внесенными в него коэффициентами влияния водной среды. Исходя из полученного графика, можно сделать вывод, что при данной длительности символа невозможно

выделить первоначальную комбинацию после преобразования в гидроакустическом канале из-за влияния межсимвольной интерференции.

На рис. 5 представлен график проверки блока имитации доплеровского эффекта, на котором отображено сравнение изначальной двоичной последовательности и полученной после прохождения блока имитации доплеровского эффекта (БИДЭ) сигнала.

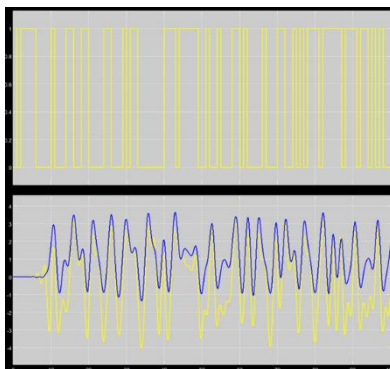


Рис. 4. Показательный график работы БИИХГК

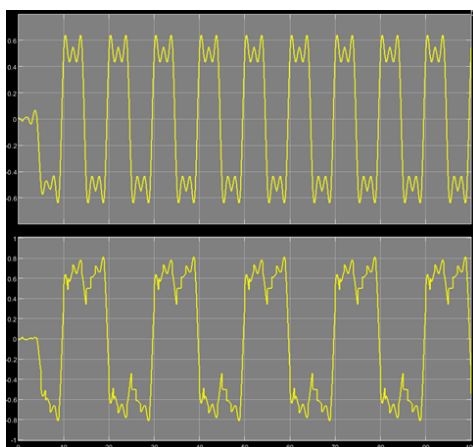


Рис. 5. Показательный график работы БИДЭ

При длительности единичного импульса в 5 системных отсчетов и длительности полупериода синусоиды в 10 системных отсчетов получается увеличение длительности полученного импульса в 2 раза, что говорит об уменьшении частоты сигнала при прохождении гидроакустического канала.

Исходя из полученных графиков, можно визуально оценить отсутствие влияния межсимвольной интерференции при длительности одного символа равному трем системным отсчетам. Сигнал на выходе БИИХГК так же имеет задержку в 10 отсчетов, связанную с особенностью работы смоделированного КИХ-фильтра, которая образуется как нулевая реакция

ожидания входных отсчетов, необходимых для получения выходного значения.

Заключение. В рамках проведенной работы был рассмотрен метод гидроакустической беспроводной передачи данных, а также влияние гидроакустического канала на сигнал. Было произведено моделирование макета канала гидроакустической связи в среде имитационного визуального программирования Simulink. Так как гидроакустический канал передачи является сложной средой, обладающей своими собственными характеристиками, отличающимися от проводных и воздушных каналов передачи, основной задачей явилась разработка модели самого гидроакустического канала. Были получены показания, соответствующие работоспособности модели канала. Данный этап моделирования необходим для дальнейшей реализации цифровой части гидроакустического модема.

Библиографический список

1. Куприков, О.Д. Анализ особенностей использования различных видов модуляции в гидроакустическом канале / О.Д. Куприков, С.С. Шаврин // Телекоммуникации и информационные технологии: научный журнал. – 2021. – Т. 8, №2. – С. 63–68.
2. Eade, E. Edge landmarks in monocular SLAM / E. Eade, T. Drummond // Image and Vision Computing. – 2009. – Vol. 5. – P. 588–596.
3. Endres, F. An evaluation of the RGB-D slam system / F. Endres, J. Hess, N. Engelhard, J. Sturm, D. Cremers, W. Burgard // 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – 2012. – 6 p.
4. Stühmer, J. Real-time dense geometry from a handheld camera / J. Stühmer, S. Gumhold, D. Cremers // Pattern Recognition (DAGM). – 2010. – P. 11–20.
5. Душин, С.В. Тенденции и перспективы развития беспроводной подводной связи / С.В. Душин, М.П. Фархадов, С.С. Шаврин, В.С. Алешин // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. – 2020. – №2. – С. 11–18.
6. Душин, С.В. Использование среднего частотного диапазона акустических волн для передачи информации в поверхностных водах / С.В. Душин, В.С. Алешин, С.С. Шаврин, М.П. Фархадов, И.Ю. Куров // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2021. – № 54. – С. 38–47.
7. Blouin, S. Autonomy and networking challenges of future underwater systems / S. Blouin, G.J. Heard, S. Pecknold // 2015 IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). – 2015. – P. 1514–1519.
8. Akyildiz, I.F. Underwater acoustic sensor networks: research challenges / I.F. Akyildiz, D. Pompili, T. Melodia // Elsevier's Ad Hoc Networks. – 2005. – Vol.3. – P. 257–279.
9. Demirors, E. A High-Rate Software-Defined Underwater Acoustic Modem With Real-Time Adaptation Capabilities / E. Demirors, G. Sklivanitis, G. E. Santagati, T. Melodia, S.N. Batalama // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 18602–18615.

10. Walree, P.V. The Watermark manual and user's guide version 1.0 / P.V. Walree, R. Othens, T. Jenserud. – Norwegian Defence Research Establishment (FFI), 2016. – 40 p.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИБЛИОТЕКИ TENSORFLOW ДЛЯ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ДОБЫЧЕ ГАЗА

А.Р. Латипов, А.В. Ахметзянов

Приведены результаты применения библиотеки TensorFlow для моделирования нестационарного поля давления при отборе газа из замкнутых месторождений газа. Иначе говоря, для решения начально-краевой задачи для нелинейного уравнения фильтрации газа в пористых средах при заданных начальных и граничных условиях.

Ключевые слова: месторождение, пористая среда, модель фильтрации, нелинейное уравнение, начально-краевая задача.

Разработка газовых месторождений, как правило, производится в режиме истощения. При этом предполагается, что:

- месторождение замкнутое, т. е. приток газа на внешнем контуре отсутствует (градиент давления по нормали равен 0),
- на скважинах производится постоянный отбор.

Уравнения изотермической (температура неизменна, поскольку приток и отток энергии отсутствует) фильтрации реального газа в пористых средах резервуаров газовых месторождений представляются уравнениями неразрывности (сохранения массы), движения (закон Дарси) и состояния. В результате стандартных преобразований [1] эти преобразуются в нелинейное уравнение относительно давления газа

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{z(p)} \right) = \frac{k}{2m} \operatorname{div} \left(\frac{1}{\mu(p)} \frac{1}{z(p)} \operatorname{grad} p^2 \right), \quad (1)$$

где p – давление, МПа; k – коэффициент проницаемости, м²; m – пористость, д.ед.; $\mu(p)$ – вязкость газа, мПа*с; $z(p)$ – коэффициент сверхсжимаемости газа д.ед. Здесь предполагается, что вязкость и сжимаемость не зависят, при этом значения функции $z(p)$ аппроксимируются на базе диаграммы Стендинга–Катца [2] (рис. 1) при заданном значении температуры в пористой среды пласта газовой залежи.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

$$p_{\text{пр}} = p/p_0, T_{\text{пр}} = T/T_0,$$

где $p_{\text{пр}}$, $T_{\text{пр}}$ – приведенные значения давления, температуры и коэффициента сверхсжимаемости, p_0 , z_0 – давление и коэффициент сверхсжимаемости при стандартных условиях ($p_0 = 0.101325$ МПа, $T_0 = 293.15$ К).

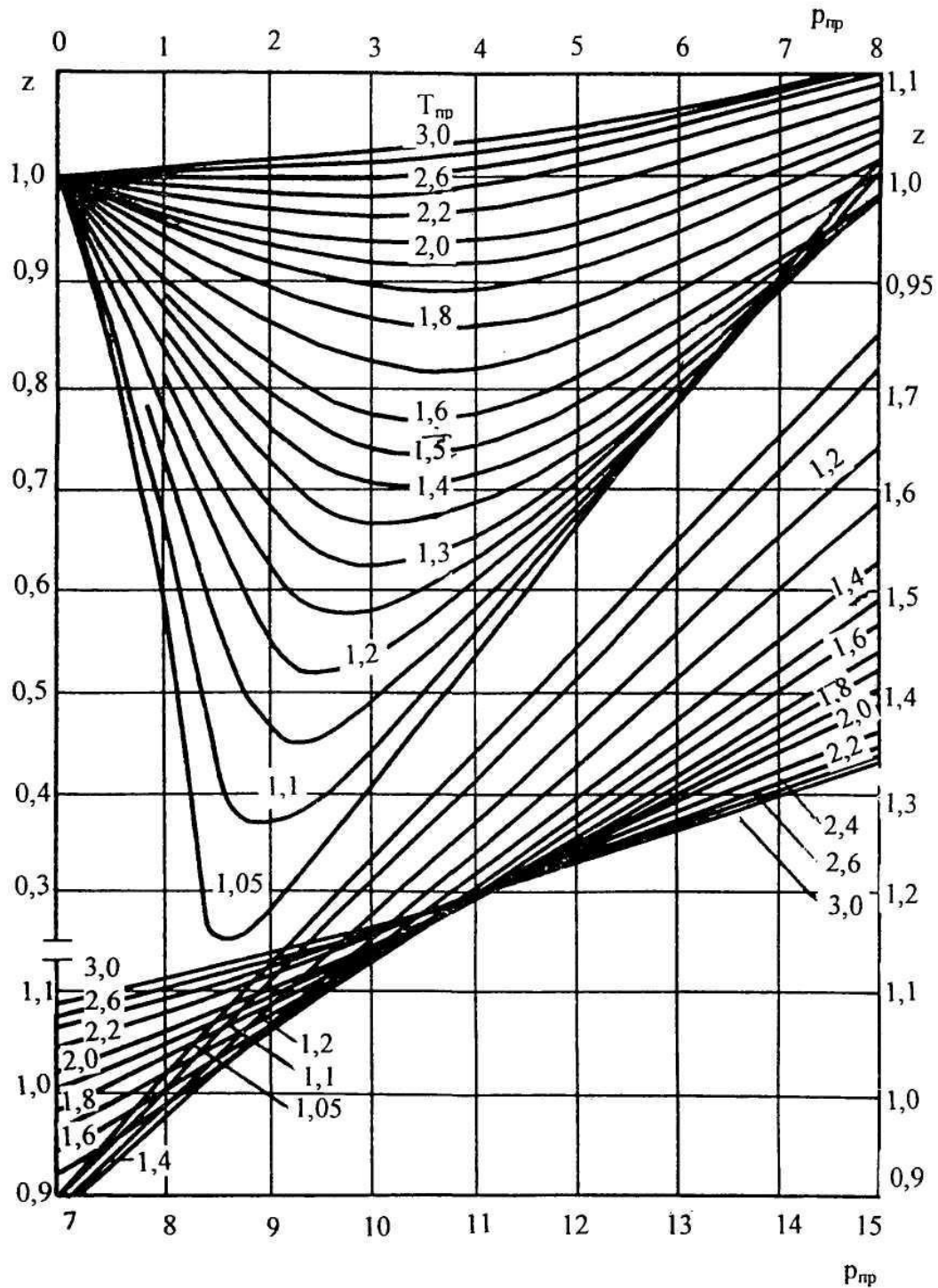


Рис. 1. Диаграммы Стендинга-Катца

В этих условиях модель расчета давления представляется в виде начально-краевой задачи для нелинейного уравнения (1), а в качестве начальных и граничных условий выберем следующие соотношения

$$p(x, y, t_0) = p_0(x, y), \quad (x, y) \in \bar{\Omega}, \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial n}\right)_{\partial\Omega} = 0, \quad (3)$$

$$Q_j = 2\pi r_c h \left(\frac{\partial p}{\partial n} \right)_{\partial \omega} = \text{const}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где $p_0(x, y)$ – начальное распределение квадрата давления в замкнутом резервуаре залежи газа $\bar{\Omega}$, $(\partial p / \partial n)_{\partial \Omega} = 0$ – условие непроницаемости на внешней границе $\partial \Omega$, Q_j – постоянный во времени отбор газа на скважинах, n – количество скважин.

Для удобства записи уравнения введем замену:

$$\varphi_{x,y} = \frac{1}{\mu(p_{x,y})} \frac{1}{z(p_{x,y})}. \quad (5)$$

Тогда с учетом (5) уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{z(p)} \right) = \frac{k}{2m} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\varphi_{x,y} \frac{\partial p^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varphi_{x,y} \frac{\partial p^2}{\partial y} \right) \right). \quad (7)$$

Тогда модель расчета распределения давления в виде начально-краевой уже для полученного уравнения (7) при тех же начальных и граничных условиях (2)–(4), для решения которой необходимо воспользоваться методом конечных разностей по следующей неявной схеме.

Определим сетку:

$$\Omega = \omega_x \times \omega_y \times \omega_t, \quad (8)$$

$$\omega_x = \{x_i = ih, i = 0, \dots, N\}, \quad (9)$$

$$\omega_y = \{y_j = jh, j = 0, \dots, N\}, \quad (10)$$

$$\omega_t = \{t_k = k\tau, k = 0, \dots, N_t\}, \quad (11)$$

где h и τ – пространственный и временной шаги, соответственно.

Для упрощения введем операторы:

$$\lambda_1(f_{x,y}) = \frac{f_{x+1/2,y} - f_{x-1/2,y}}{h}, \quad (12)$$

$$\lambda_2(f_{x,y}) = \frac{f_{x,y+1/2} - f_{x,y-1/2}}{h}. \quad (13)$$

Неявная разностная схема запишется следующим образом:

$$\frac{1}{z(p)} p_{x,y}^{n+1} \frac{1}{z(p)} p_{x,y}^n = \frac{k}{2m} \left(\lambda_1(\varphi_{x,y} \lambda_1(p^2)_{x,y}^{n+1}) + \lambda_2(\varphi_{x,y} \lambda_2(p^2)_{x,y}^{n+1}) \right). \quad (14)$$

После подстановки операторов (12)–(13) в уравнение (14), перенесем в левую сторону уравнения все слагаемые, связанные с p^{n+1} , а в правую – с p^n . В итоге мы получим уравнение подобное следующему:

$$Ap^{n+1} + b = p^n, \quad (15)$$

где A – член, включающий в себя все слагаемые, связанные с p^{n+1} , b – член, учитывающий начальные и граничные условия, постоянный отбор со скважин.

После замены p^{n+1} на оценку \hat{p}^{n+1} запишем функционал ошибки:

$$r = A\hat{p}^{n+1} - p^n + b, \quad (16)$$

$$L = \sum r_{x,y}^2. \quad (17)$$

Данный функционал ошибки будет минимизироваться с помощью градиентного спуска, реализованного в библиотеке TensorFlow [3].

Вычисления в TensorFlow выполняются при помощи графа потоков

данных. Этот граф состоит из узлов, отображающих операции, и ребер, отображающих потоки данных между теми узлами графа, которые они соединяют. Таким образом, решение нелинейного уравнения распределения давления сводится к перемножению тензоров и градиентному спуску.

Рассмотрим пример решения задачи. Объектом исследования является модель газовой залежи, представленная квадратной сеткой 100×100 ячеек. Добывающие скважины в количестве 4 штук симметрично расположены на равном удалении от углов сетки.

Исходные данные: $p_0 = 7.5$ МПа, $T = 290$ К, $k = 0.73$ м², $m = 0.3$.

Значение постоянного дебита скважин составляет $Q_1 = 1.0 \cdot 10^5$ м³/сут, $Q_2 = 1.4 \cdot 10^5$ м³/сут, $Q_3 = 1.2 \cdot 10^5$ м³/сут, $Q_4 = 0.8 \cdot 10^5$ м³/сут, радиус скважин $r_c = 0.1$ м.

При данных значениях пластового давления и температуры изменением вязкости газа было решено пренебречь, постоянное значение вязкости взято $\mu = 0.0186$ Па · с.

Коэффициент сверхсжимаемости газа z рассчитывается с использованием модифицированного уравнения состояния GERG-91 мод. [4] для определенного состава газа. Данное уравнение состояния применимо для природных газов с плотностью $\rho_c = 0.668 - 0.70$ кг/м³, не содержащих сероводород, в интервале температур 250–330 К и давлений до 12 МПа. При более высоких значениях пластового давления данный метод расчета коэффициента сверхсжимаемости неприменим, так как ведет к погрешностям, превышающим допустимую норму.

В начале был проведен расчет без добычи газа из скважин. В результате пластовое давление держалось на уровне начального пластового давления на протяжении всего временного отрезка, что говорит о корректности настройки параметров оптимизатора.

В результате расчета с постоянной добычей газа из скважин было получено распределение давления для каждой точки сетки на каждом временном шаге. На первых временных шагах можно наблюдать образование воронок депрессии вокруг каждой из скважин (рис. 2). Глубина воронок депрессии увеличивается на протяжении всего расчета из-за постоянного отбора газа со скважин. Распределение давления на последнем временном шаге показано на рис. 3.

Пластовое давление снизилось с $p_0 = 7.5$ МПа до $p_k = 3.3$ МПа. Коэффициент сверхсжимаемости газа z при этом изменялся в пределах от $z_0 = 0.86$ до $z_k = 0.94$. Полученная зависимость $z(p)$ (рис. 4) для данного интервала изменения давления p имеет характер близкий к линейному, однако при больших значениях пластового давления и перепадах на забое скважин, все больше будет наблюдаться нелинейность данной зависимости.

Время расчета на компьютере средней мощности составило 3 ч. 45 мин.

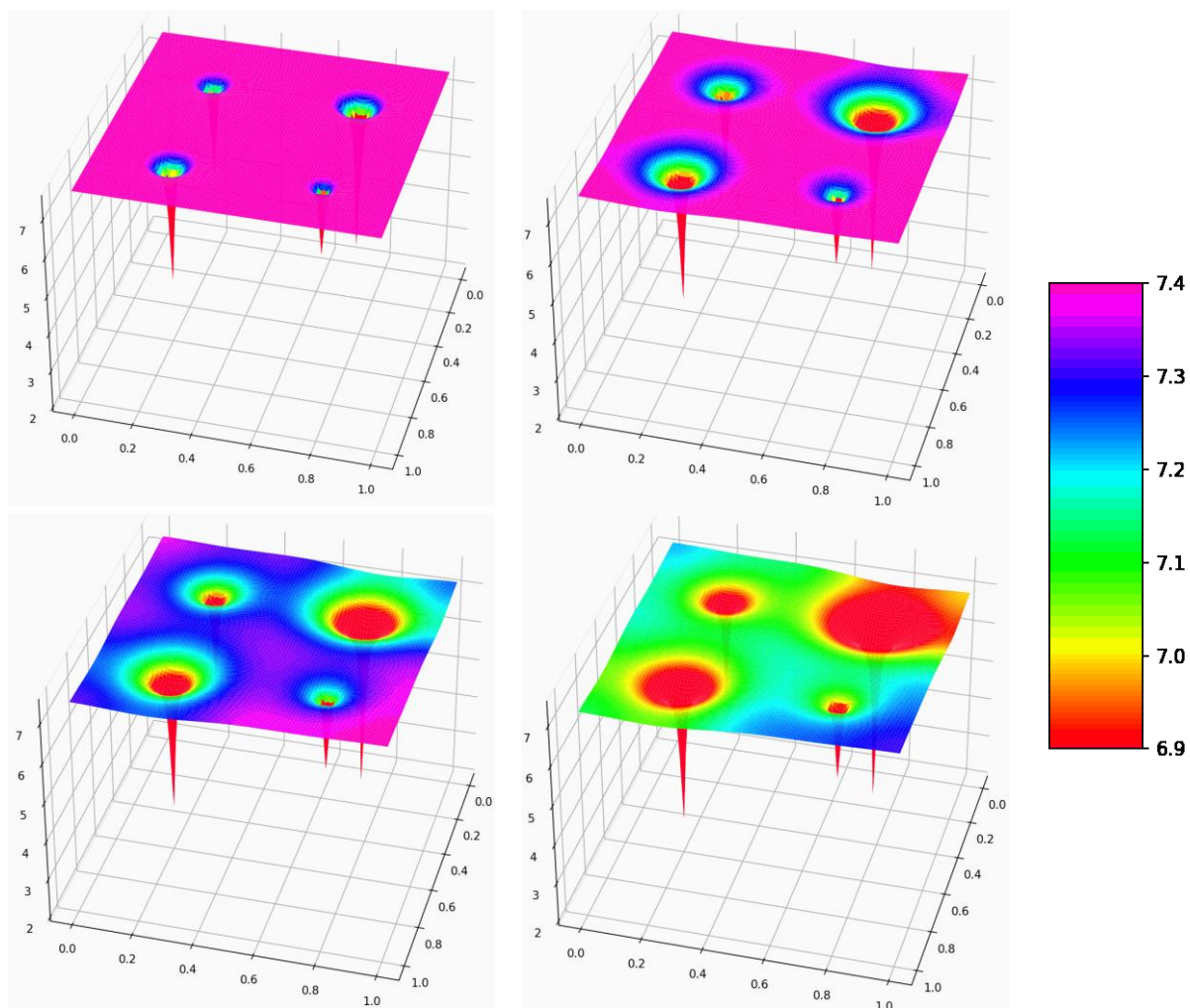


Рис. 2. Процесс образования воронок депрессии вокруг скважин.
 Горизонтальные оси – координаты x и y , вертикальная ось – давление p

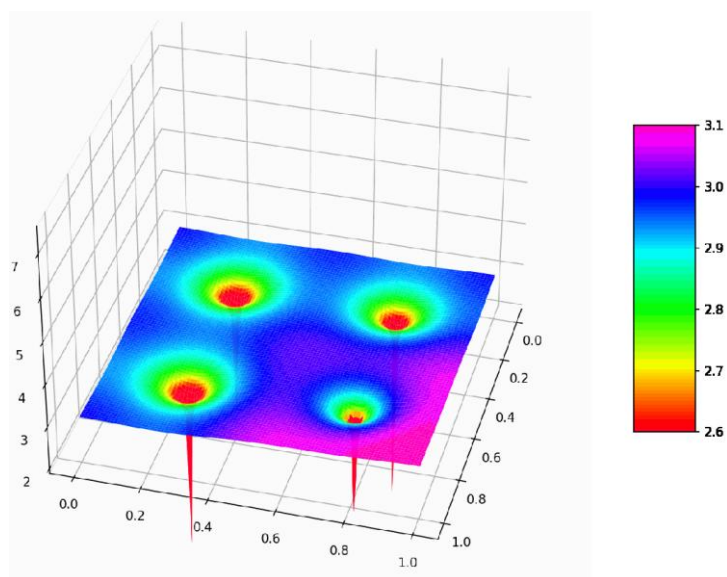


Рис. 3. Распределение давление на последнем временном шаге

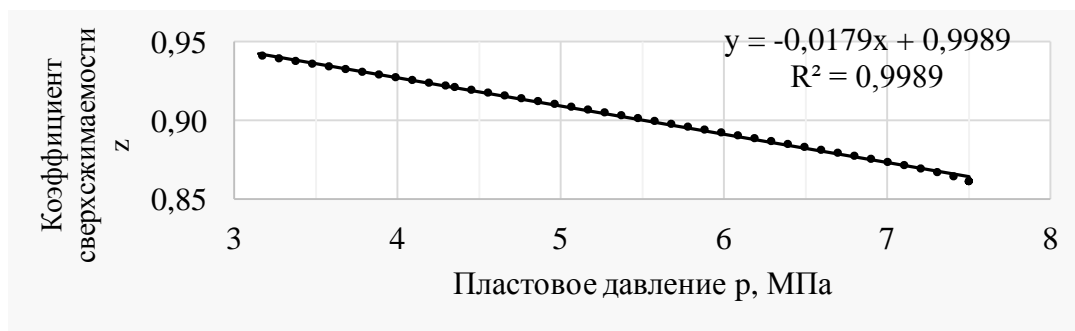


Рис. 4. Зависимость коэффициента сверхсжимаемости газа от пластового давления

Заключение. Из проведенных в работе вычислительных экспериментов следует, что использование библиотеки TensorFlow целесообразно только при решении локальных задач моделирования фильтрационных потоков газа в резервуарах газовых месторождений. При управлении разработкой месторождений в целом, когда число скважин достаточно велико, необходимая конечно-разностная аппроксимация резервуара месторождения приводит к очень большой размерности системы нелинейных сеточных уравнений, для решения которых эффективных программных средств не существует.

В общем случае, для создания моделей нестационарной фильтрации газа и алгоритмов управления разработкой газовых месторождений (предмет основных исследований авторов) необходимо воспользоваться методами распараллеливания вычислений с использованием:

- теории возмущений, для итеративной линеаризации нелинейного уравнения распределения давления вида (1) или (7);
- декомпозиции в сочетании с многосеточной аппроксимацией зон дренирования (областей притока газа) скважин.

Библиографический список

1. Басниев, К.С. Подземная гидромеханика. Серия: Современные нефтегазовые технологии / К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Р.Д. Каневская, В.М. Максимов. – Ижевск-Москва: Институт компьютерных исследований, 2006. – 488 с.
2. Standing, M.B. Density of natural gases / M.B. Standing, D.L. Katz // Transactions of the AIME. – 1942. – Vol. 146, No. 1. – P. 140–149.
3. Abadi, M. TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems / M. Abadi, A. Agarwal, P. Barham, et al. // tensorflow.org, 2015 – URL: <https://www.tensorflow.org> (дата обращения: 18.07.2022).
4. ГОСТ 30319.2-2015. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Вычисление физических свойств на основе данных о плотности при стандартных условиях и содержании азота и диоксида углерода. – М.: Стандартинформ, 2008. – 16 с.

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОСТРУЙНОГО ГЕНЕРАТОРА

А. А. Мамонтова, А. А. Сухоруков

Разработаны аппаратно-программные средства для экспериментального исследования передаточных и нагрузочных характеристик микроструйного семикаскадного генератора. Аппаратно-программные средства включают частотный измерительный преобразователь на основе микроконтроллера с пьезоэлектрическим датчиком и входным дифференциальным усилителем, специализированное программное обеспечение для аппроксимации нагрузочных характеристик степенной функцией с рациональным показателем при помощи метода наименьших квадратов.

Ключевые слова: струйный датчик скорости, струйный генератор, метод наименьших квадратов, микроконтроллер.

Экспериментально доказанные высокие рабочие характеристики микроструйных элементов в сочетании с их малыми размерами во многом определяют тенденцию к реализации струйных схем в виде интегральных модулей – единой конструкции, без применения объемного монтажа. Интегральное исполнение устройств струйной техники позволяет исключить, либо значительно минимизировать коммутационные связи между элементами, снизить потери энергии при передаче сигналов и выполнять заданные функции с высоким быстродействием, свойственным отдельным микроструйным элементам [1]. В зависимости от конструктивного исполнения, рабочие характеристики интегральных микроструйных модулей могут изменяться в значительном диапазоне, даже если их рабочий профиль остается постоянным. Одним из наиболее важных функциональных узлов большинства цифровых устройств струйной техники является генератор тактовой частоты [2]. Рабочая частота тактовых генераторов электронных устройств может изменяться в широких пределах, без существенного изменения амплитуды выходного сигнала, а высокое входное сопротивление современных цифровых микросхем обеспечивает возможность использования одного тактового генератора для большой многофункциональной схемы. В отличие от электронных устройств, характеристики выходного (частотного) сигнала микроструйных генераторов сильно зависят от негативных механических эффектов в рабочих камерах и каналах (отраженные волны, кромочные эффекты и др.). Выходной сигнал ограничен по быстродействию

скоростью звука в рабочей среде, при этом в рабочем диапазоне частот амплитуда выходного сигнала может изменяться в десятки раз. Таким образом, коэффициент разветвления микроструйных генераторов имеет сильно выраженную частотную зависимость. Поэтому, экспериментальное исследование функциональных характеристик микроструйного генератора является актуальной задачей.

В дополнение к вышеизложенному следует отметить необходимость развития инструментальных средств для измерения и преобразования микроструйных сигналов в следующих областях техники:

- создание резервных микроструйных каналов управления и их сопряжение с основными (электронными) каналами;
- комплексирование данных от разнородных каналов управления с целью увеличения объема информации о состоянии системы;
- создание первичных микроструйных преобразователей для определения параметров движения летательных аппаратов в условиях жестких дестабилизирующих факторов окружающей среды (высокие и низкие температуры, высокие уровни электромагнитного и/или корпускулярного излучений), для регулирования расходов жидкостей и газов (в том числе, химически агрессивных), для управления исполнительными механизмами роботов с пониженным уровнем электромагнитного излучения и др.
- автоматизация процесса обработки экспериментальных данных, полученных при исследовании микроструйных элементов и устройств.

Пневмоэлектрический измерительный преобразователь на основе микроконтроллера обеспечивает возможность преобразования пневматического микроструйного сигнала в электрический сигнал, фильтрации синфазных помех, исключения множественности фронтов, преобразование псевдогармонического сигнала с выхода микроструйного генератора в прямоугольный сигнал, соответствующий входным логическим уровням микроконтроллера, измерения частоты выходного сигнала и давления питания генератора.

Преобразователь предназначен для использования, как в качестве отдельного устройства, так и в качестве встраиваемого модуля в составе экспериментальных стендов и макетов струйных систем управления. В качестве примера, в статье рассмотрен вариант построения экспериментального стенда для исследования передаточных и нагрузочных характеристик семикаскадного микроструйного генератора с характеристическим размером элементов его каскадов равным 100 мкм.

Структурная схема стенда представлена на рис. 1. Пневматический сигнал от источника питания ИП (пневмосеть или компрессор) поступает на фильтр тонкой очистки Φ и, далее, на задатчик давления ЗД, при

помощи которого устанавливается требуемое давление питания, исследуемого микроструйного генератора МСГ.

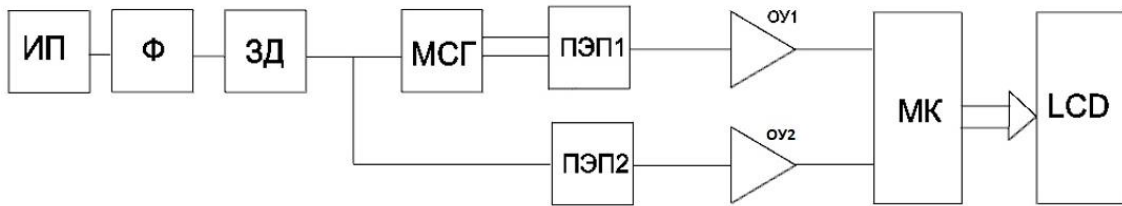


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда

Принципиальная схема, элементы каскадов и схема подключения МСГ к пьезоэлектрическому датчику представлены на рис. 2. Пневматический частотный сигнал на выходе генератора и сигнал с постоянным давлением на его входе преобразуются в электрические сигналы при помощи пьезоэлектрических преобразователей ПЭП1, ПЭП2. Микроструйный выходной сигнал генератора, после пьезоэлектрического преобразователя ПЭП1, поступает на вход дифференциального усилителя У1, который выполняет усиление малого электрического сигнала (~ 20 мВ) и ослабление синфазных помех, поступающих вместе с полезным (измеряемым) сигналом на вход усилителя.

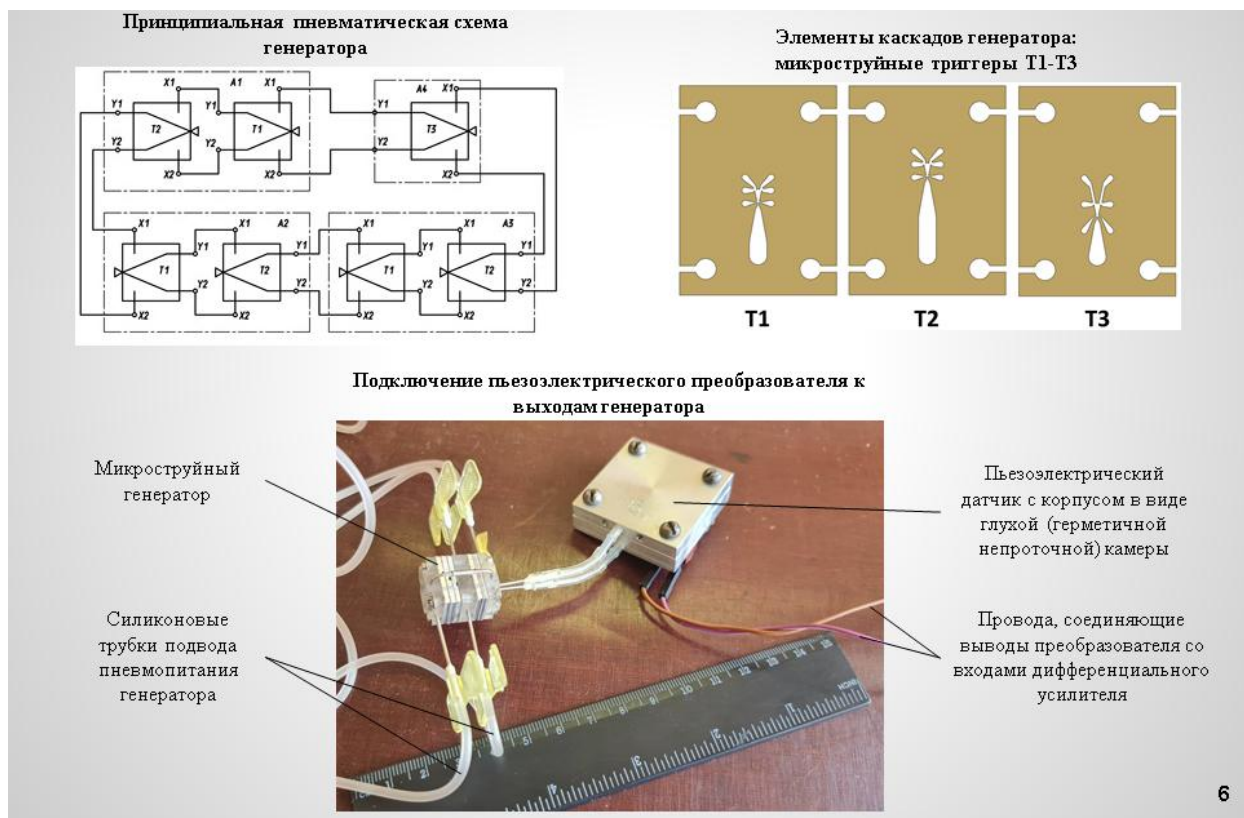


Рис. 2. Данные для анализа работы и исследования МСГ

Множественность фронтов сигнала (рис. 3), источником которой является мембрана с ПЭП1, исключается при помощи фильтра низких частот (ФНЧ) с частотой среза 200...250 Гц. При этом на выходе ФНЧ формируется псевдогармонический сигнал амплитудой около 2 В. Последующее преобразование этого сигнала компаратором обеспечивает изменение формы сигнала на прямоугольную и увеличение амплитуды до уровня «1» на входе микроконтроллера МК (рис. 4). Сигнал с постоянным давлением на входе питания МСГ фильтруется и усиливается дифференциальным усилителем УС2, после чего поступает на аналоговый вход МК. Вычисленные МК значения частоты выходного сигнала и давления питания МСГ отображаются на жидкокристаллическом индикаторе LCD.

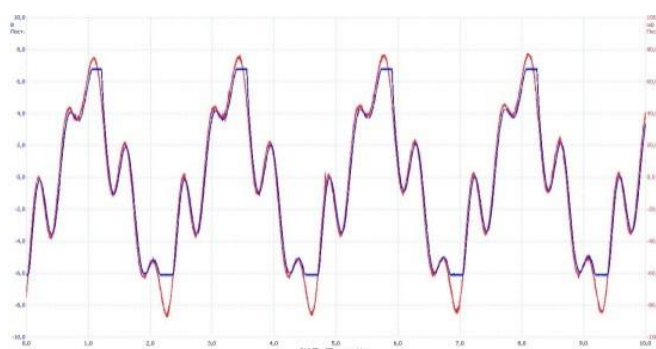


Рис. 3. Пример множественности фронтов сигнала МСГ

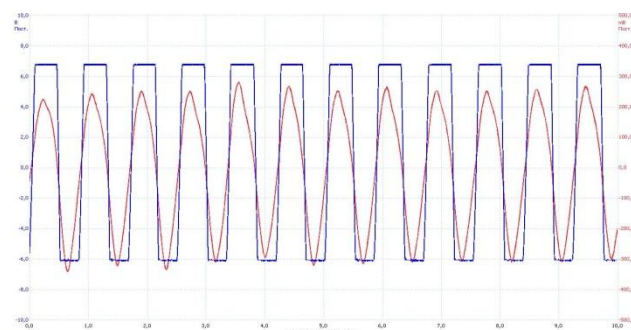


Рис. 4. Преобразование псевдогармонического сигнала в сигнал с заданным логическим уровнем и формой

Компьютерная модель пневмоэлектрического измерительного преобразователя представлена на рис. 5. Разработка и моделирование электрической принципиальной схемы измерительного преобразователя, а также разработка и отладка управляющей программы микроконтроллера, выполнены при помощи online платформы tinkercad.com.

На основе разработанной компьютерной модели изготовлен макет пневмоэлектрического преобразователя, внешний вид которого представлен на рисунке 6а. Испытание макета выполнены при помощи сравнения показаний LCD-индикатора с показаниями осциллографа

DSO 475 (рис. 6, б) при подаче на вход макета эталонного электрического сигнала от генератора сигналов специальной формы Г6-29.

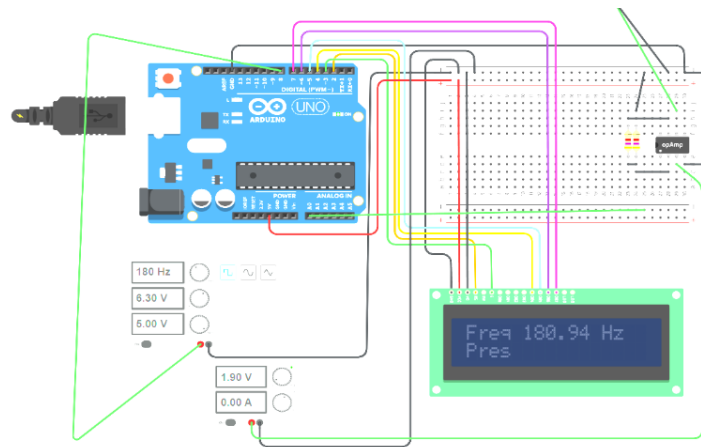
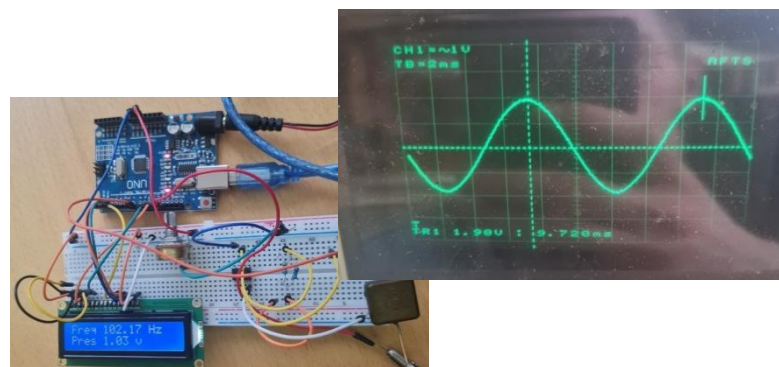


Рис. 5. Компьютерная модель преобразователя



а)

б)

Рис. 6. Внешний вид макета (а) и осциллограмма испытаний (б)

Представленный выше пневмоэлектрический измерительный преобразователь предназначен для экспериментального исследования передаточных характеристик микроструйного генератора, т.е. зависимости его выходной частоты от давления питания на входе. Еще одним важным видом характеристик генератора являются нагрузочные характеристики, отражающие зависимость перепада давления на генераторе и его выходного расхода от гидравлического сопротивления нагрузки. Нагрузочные характеристики необходимы для согласования микроструйного генератора с управляемыми устройствами. При этом, для удобства их использования, должна быть обеспечена возможность выбора нагрузки на основании известных энергетических характеристик управляемых устройств: входное давление и входной расход; или потребляемая мощность пневматических устройств. Поэтому необходимы

программные средства автоматизации, обеспечивающие возможность аппроксимации нагрузочных характеристик и представления расхода как функции одной переменной – перепада давления – с автоматизированным поиском неизвестного коэффициента. В этой связи ниже представлены результаты разработки инструментального программного средства автоматизации для выполнения процедуры аппроксимации нагрузочных характеристик микроструйных устройств степенной функцией с рациональным показателем и поиском неизвестного коэффициента при помощи метода наименьших квадратов.

Алгоритм работы программного обеспечения включает следующие основные операции:

- 1) ввод значений плотности рабочего вещества (газа, жидкость);
- 2) ввод значений перепада давления (ΔP) на измерительных гидравлических сопротивлениях (дресселях);
- 3) ввод значений коэффициента расхода;
- 4) ввод значений площади поперечного сечения капилляров дресселей;
- 5) вычисление значений расхода Q по введенным экспериментальным данным;
- 6) вывод числовых значений Q_i в соответствующие программные ячейки;
- 7) отображение в программном окне (оси координат ΔP - Q) точек, соответствующих вычисленным значениям Q_i ;
- 8) задание шага дискретизации области возможных значений неизвестного коэффициента, вычисляемого при аппроксимации;
- 9) вычисление неизвестного коэффициента при помощи метода наименьших квадратов;
- 10) отображение расчетных значений Q_p , соответствующих вычисленному значению неизвестного коэффициента;
- 11) построение графика аппроксимирующей функции.

В соответствии с вышеприведенными операциями разработана блок-схема алгоритма работы программы (рис. 7) и его программная реализация (рис. 8). Интерфейс разработанного программного обеспечения можно условно разделить на две области (область ввода и область вывода данных), которые включают следующие органы управления.

Область ввода данных:

- окно для ввода значения плотности;
- окна для ввода значений перепада давления;
- окна для ввода значений коэффициента расхода;
- окна для ввода значений площади поперечного сечения;
- окно для задания шага изменения коэффициента расхода.

Область вывода данных включает:

- окна вывода рассчитанных значений экспериментального расхода;
- кнопка «Вычислить Q », вычисляющая экспериментальные значения расхода;
- кнопка «Отобразить», отображающая экспериментальные точки, соответствующие нагрузкам триггера;
- кнопка «Вычислить Q_p », подбирающая подходящий коэффициент и вычисляющая расчетный расход;
- кнопка «Построить график», строящая аппроксимирующую прямую по рассчитанным значениям в окне построения графика;
- окна вывода рассчитанных значений подходящих коэффициентов расхода;
- окна вывода рассчитанных значений расчетного расхода.

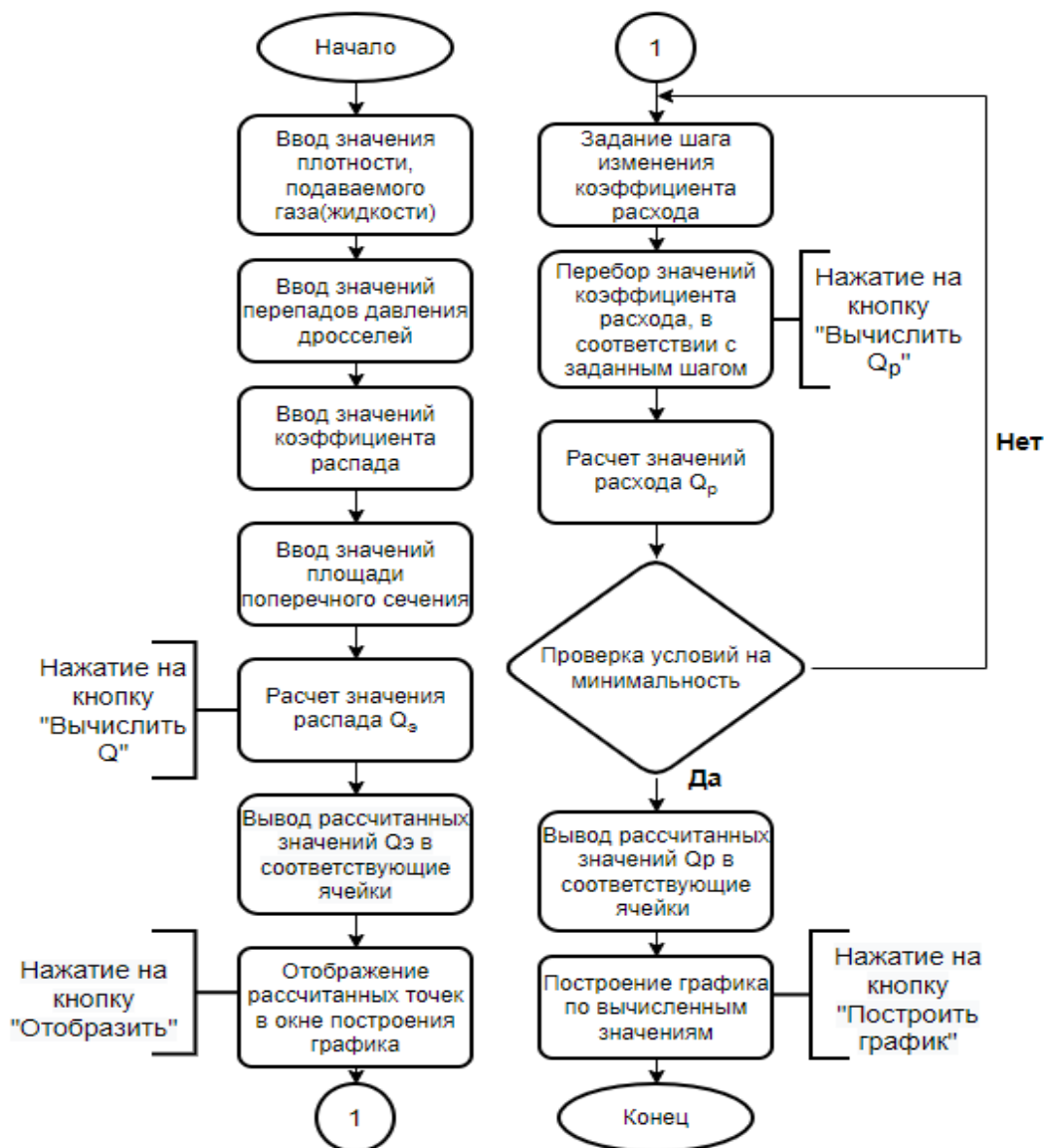


Рис. 7. Алгоритм работы программы

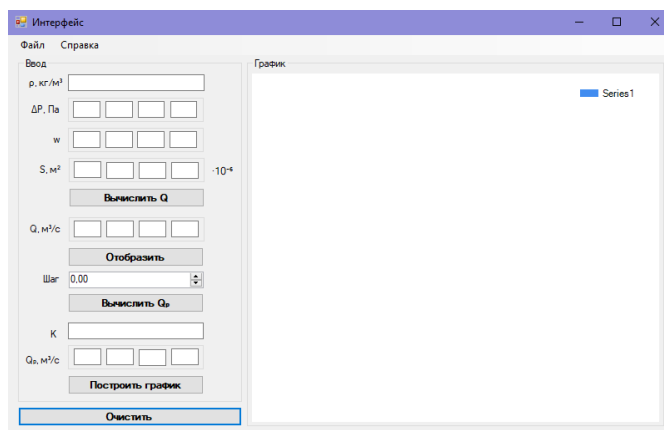


Рис. 8. Интерфейс пользователя программы

Вычисление расхода по экспериментальным данным осуществляется по формуле

$$Q_{\text{э}} = wS \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (1)$$

где Q – расход, м³/с; w – коэффициент расхода, учитывающий гидравлические потери; S – площадь поперечного сечения дроссельного капилляра, м²; ΔP – перепад давления на дросселе, Па; ρ – плотность рабочего вещества, кг/м³.

В результате процедуры аппроксимации выражение (1) должно быть сведено к выражению

$$Q_{\text{р}} = K\sqrt{\Delta P}. \quad (2)$$

Выбор шага дискретизации области возможных значений неизвестного коэффициента K выбирается в соответствии с решаемой задачей (тип микроструйного устройства, энергетические характеристики, условия эксплуатации и т. д.). Вычисление значения K осуществляется при помощи метода наименьших квадратов в соответствии с формулой

$$\Delta = \sum (Q_{\text{э}} - Q_{\text{р}})^2 \rightarrow \min,$$

где $Q_{\text{э}}$, $Q_{\text{р}}$ – значения расхода, м³/с, вычисленные по формулам (1) и (2), соответственно.

Заключение. В результате работы созданы инструментальные средства для экспериментального исследования передаточных и нагрузочных характеристик элементов и устройств микроструйной техники. Разработанный пневмоэлектрический измерительный преобразователь обеспечивает возможность исследования передаточных характеристик в условиях широкого спектра помех и во всем диапазоне частот микроструйных сигналов. Разработанное специализированное программное обеспечение предназначено для построения нагрузочных

характеристик и их приведения к виду функции одной переменной, что значительной упрощает процесс разработки струйных систем управления.

Библиографический список

1. Балабанов, А.В. Разработка и изготовление экспериментального образца семикаскадного микроструйного генератора / А.В. Балабанов, А.М. Касимов, В.Я. Фатеев // Датчики и системы. – 2021. – №1. – С. 63–68.

2. Балабанов, А.В. Разработка и исследование рабочих характеристик микроструйного генератора / А.В. Балабанов, А.М. Касимов // Датчики и системы. – 2019. – №7–8. – С. 34–40.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРИКОРМА РЫБ ПРИ ПОМОЩИ БПЛА

Н.А. Мостаков, Н.В. Голобурдин, В.С. Бакаев, К.А. Кулагин

Целью доклада является подробное описание процесса автоматического прикорма рыб с использованием беспилотного летательного аппарата. Рыбоводство одно из отраслей сельского хозяйства где практически не используются средства роботизации. Данный доклад демонстрирует все преимущества и эффективность использования БПЛА для прикорма рыб. Для упрощения процесса использования БПЛА конечным пользователем было разработано специальное программное обеспечение, позволяющие создавать точное полетное задание и выбирать конкретное место сброса корма.

Ключевые слова. Симулятор, БПЛА, прикорм рыбы, рыбное хозяйство.

Введение. В настоящее время все чаще начинают использоваться БПЛА в различных сферах человеческой жизни и рыбоводство не стало исключением. В статье [1] описываются современные подходы и практики в кормлении рыб. Доклад [2] демонстрирует что рыбная отрасль в нашей стране находится в стадии развития и только начинает переходить на инновационный путь развития, исходя из этих данных можно предположить, что совсем скоро в рыбной отрасли все чаще начнут использоваться БПЛА. Так беспилотные летательные и плавательные аппараты со временем заменяют лодки, управляемые человеком (рис. 1).



Рис. 1. Прикорм рыбы на морских фермах

В источнике [3] продемонстрированы различные варианты использования БПЛА в рыбном хозяйстве. Кроме БПЛА активно используют подводные роботы [4, 5], обычно целью таких роботов является наблюдение за состоянием рыб. Кроме этого, подводные роботы используются в доставке корма на морские фермы. Явным преимуществом использования БПЛА, по сравнению с использованием подводных и надводных роботов, является: возможность простой доставки корма, упрощенная логистика и минимальные требования к персоналу после прохождения базового обучения.

Формулировка проблемы. Все рассмотренные выше решения не способны в полной мере удовлетворить потребности рыболовных хозяйств. Так, например, технологический процесс с использованием лодки экономически не выгоден по нескольким причинам:

- вынуждает держать в штате человека, умеющего управлять лодкой;
- логистические проблемы по содержанию морского транспорта (оборудованный пирс, периодическое техническое обслуживание лодки).

Использование беспилотного летального аппарата в качестве доставки корма рыбам значительно упрощает логистику рыбных ферм.

Архитектура системы. Разработанный программно-аппаратный комплекс состоит из нескольких основных модулей:

- планировщик полетных заданий и анализ логов;
- программа запуска;
- веб-сервис;
- БПЛА.

В зависимости от поставленной задачи предусматривается одновременное использование нескольких БПЛА, как одинакового, так и разных типов. Используемые БПЛА должны иметь возможность общаться по протоколу MavLink.

На рис. 2 представлен процесс эксплуатации системы автоматической прикорма рыб. Данный процесс состоит из четырех основных этапов:

1) создание карты пространства – создается точная карта эксплуатируемого водоема или части моря, создаются настраиваемые модели ферм;

2) передача планировщика конечному пользователю – на данном этапе проводится инструктаж по использованию планировщика (создание полетного задания, изменение параметров задания, изменение местоположения и размера ферм и т.д.), также создается базовое полетное задание для БПЛА;

3) создание полетного задания – пользователь может редактировать базовое полетное задание;

4) прикорм рыбы.

При созданном полетном задании пользователю остается только загрузить корм в БПЛА и отправить команду начала выполнения полетного задания.



Рис. 2. Процесс работы системы

Планировщик полетного задания. Для того чтобы пользователь мог самостоятельно изменять полетное задание было разработано специальное программное обеспечение. Пользователю предоставляется уже готовое пространство, где он может динамически менять окружение, изменять расположение садков, добавлять новые фермы и удалять старые. Процесс создания полетного задания для подкормки рыб изображен на рис. 3.



Рис. 3. Процесс создания полетного задания для подкормки рыбы

Одним из основных преимуществ данного планировщика является хорошая графическая составляющая, позволяющая, даже не подготовленному пользователю, работать с ним. Так, например, в программное обеспечение от компании UGCS [1] хоть и обладает схожим функционал с разработанным планировщиком, но сильно уступает ему в графической части. Отрисовка фотореалистичных объектов стала возможной благодаря использованию игрового движка Unreal Engine 4.

Программа запуска. Одним из преимуществ разработанного программного комплекса является наличие программы запуска и контроля БПЛА во время выполнения по полетному заданию. Интерфейс данной программы представлен на рис. 4.

С помощью данного программного модуля пользователь может выполнять следующие действия:

- загрузить созданное полетное задание на БПЛА;

- останавливать выполнение полетного задания;
- запускать выполнение проверочного полетного задания;
- скачивать данные о полете о прошедшем полете;
- в режиме реального времени отслеживать параметры БПЛА.

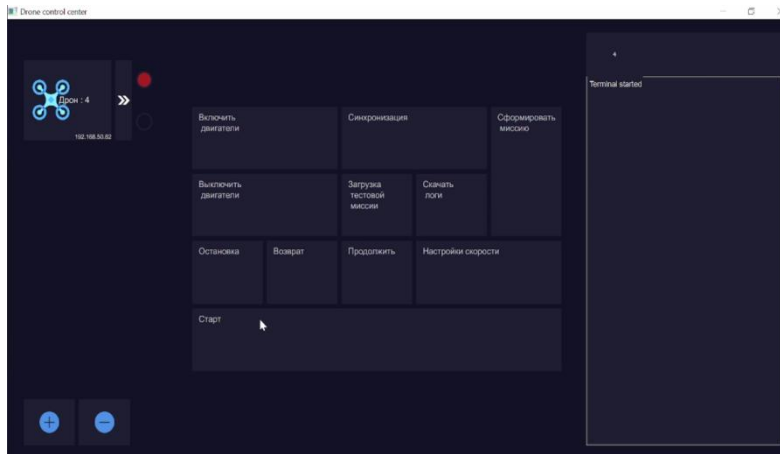


Рис. 4. Программа запуска БПЛА

Одним из преимуществ данной программы запуска является возможность взаимодействия с гетерогенной группой БПЛА.

Хранение и анализ логов. Возможность оперативно проанализировать полетное задание является одним из факторов по минимизации количества ошибок и происшествий. Планировщик предоставляет функционал по анализу полученных данных с БПЛА. Пользователь может самостоятельно выявить ключевые проблемы в полетном задании и исправить их. На рис. 5 представлен процесс анализа данных, полученных при подкормке с БПЛА.

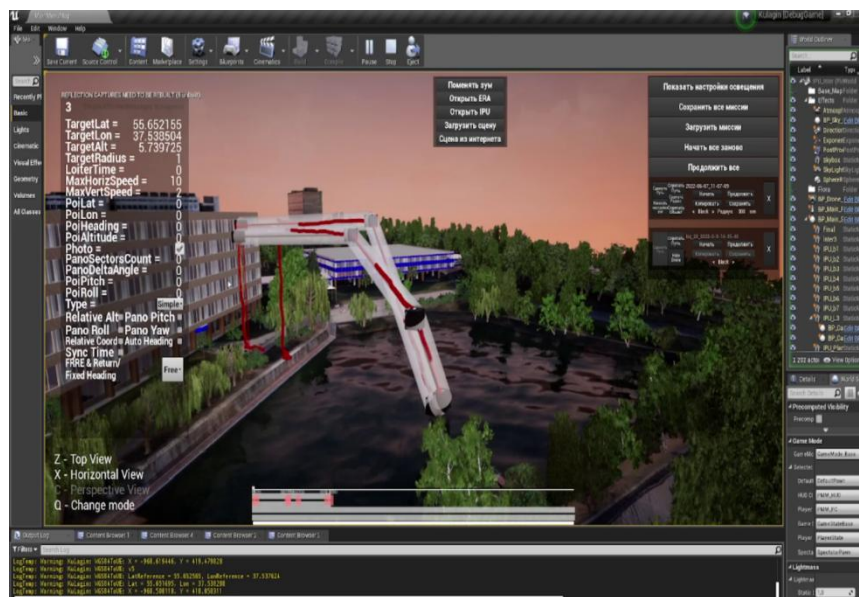


Рис. 5. Процесс просмотра данных с БПЛА

К сожалению, не все ошибки и проблемы пользователь способен выявить самостоятельно. Для возможности удаленного просмотра данных с БПЛА был разработан веб-сервис куда пользователи могут загружать свои логи. На рис. 6–7 представлен процесс выгрузки логов на веб-сервер и процесс просмотра загруженных данных.

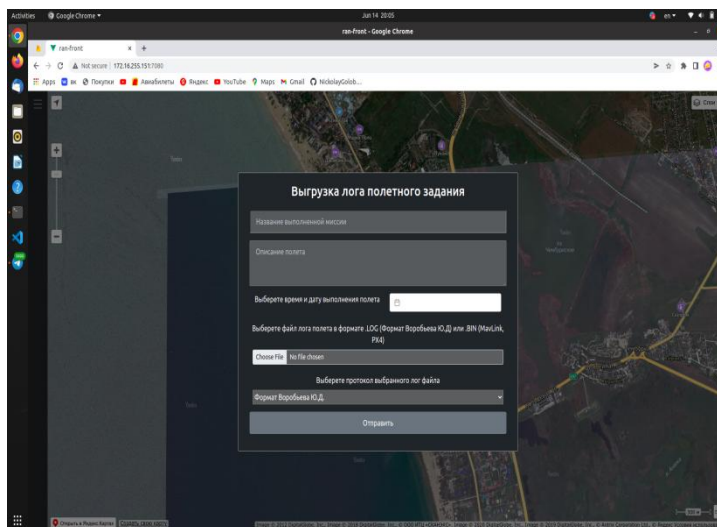


Рис. 6. Выгрузка полетного задания и логов на веб-сервер

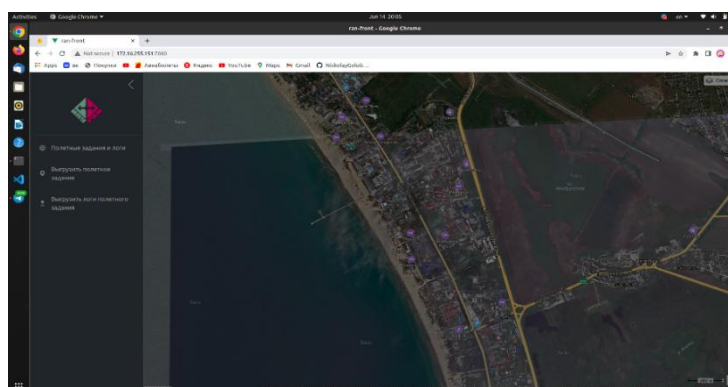


Рис. 7. Просмотр загруженного задания и логов на веб-сервере

Тестирование. Тестирование технологии подкормки рыб происходило на пруде Института проблем управления РАН. Процесс тестирования длился 14 дней, два раза в день БПЛА сбрасывал корм в одно и то же место. Одна из целей тестирования было проверить гипотезу о возможности приучения рыб к шуму БПЛА. К сожалению, из-за близости дороги это проверить не удалось. На рис. 8 изображен процесс сброса корма. В других аспектах технология показала свою полную работоспособность, БПЛА без каких-либо происшествий доставлял корм рыбам по заданию составленному посторонним человеком.

Заключение. Разработанный программный комплекс выводит процесс разведения рыб на морских фермах на совершенно новый уровень. В разы

упрощается логистика по доставке кормы на ферму, из-за простоты и доступности графического интерфейса. Также присутствует экономическая выгода от использования БПЛА: не нужно постоянное присутствие специализированной лодки, на содержание и обслуживание фермы необходимо минимальное количество персонала.

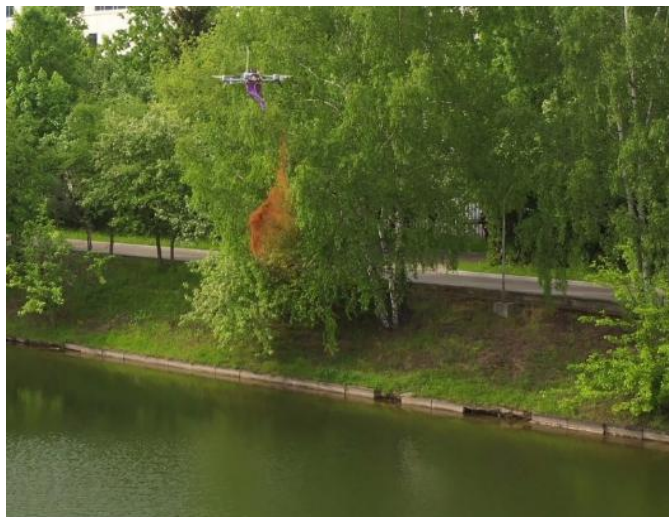


Рис. 8. Процесс сброса корма

Проведенные испытания показали хорошие эргономические качества разработанного графического интерфейса, испытуемые за минимальное количество времени освоили новый интерфейс и восстановили свои навыки через определенный промежуток времени.

Дальнейшая разработка предполагает использование БПЛА с большей грузоподъемностью, что позволит сократить количество необходимых вылетов. Одним из новых модулей, разрабатываемых для системы автоматического прикорма рыб, будет модуль анализа поведения рыб при помощи камеры установленной на БПЛА и ML решению детектирующей аномальное поведение рыб. Также планируется провести испытания на реальной морской ферме на побережье Крымского полуострова.

Библиографический список

1. Раупова, М.Я. Корм и кормление рыб / М.Я. Раупова, Л.Х. Алимova // Наука, образование и культура. – 2019. – № 2 (36). – С. 11–13.
2. Федорова, В.А. Перспективы и проблемы развития рыбной отрасли в России / В.А. Федорова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 5, Ч. 3. – С. 478–482.
3. Лайфхакер [Электронный ресурс]. – URL: <https://liferhacker.ru/drony/> (дата обращения 10.09.2022).
4. Global seafood Alliance [официальный сайт]. – Portsmouth, USA, 2018.– URL: <https://www.globalseafood.org/advocate/fish-farmers-drones-health-feed-monitoring/> (дата обращения 10.09.2022).

5. Bussines Nordway [сайт]. – Bergen, Norway, 2018. – URL: <https://www.theexplorer.no/solutions/underwater-drones-for-aquaculture-monitoring/> (дата обращения 18.09.2022).

6. Blueyrobotics [сайт]. – Trondheim, Norway, 2019. – URL: <https://www.blueyrobotics.com/blog/fish-farm-inspections-with-underwater-drones> (дата обращения 18.09.2022).

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИКИ МНОГОЗВЕННОГО РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА С ПОМОЩЬЮ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ С НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

И.В. Начевский, О.Г. Андрианова, Э.С. Слепцов

Разработан идентификатор динамики многозвеного робота-манипулятора на основе дифференциальных нейросетей с нестационарными ограничениями на состояния. Ограничения представляют собой заранее известные непрерывные функции от времени. Законы обучения получены с использованием барьерных функций Ляпунова и требуют решения дифференциального уравнения Риккати в непрерывном времени, а также нелинейных дифференциальных уравнений, зависящих от ошибки идентификации и ограничений. Проведено численное моделирование и сравнение разработанного метода идентификации с методом на основе дифференциальных нейросетей без ограничений на состояния.

Ключевые слова: идентификация динамики, дифференциальные нейросети, робот-манипулятор, барьерные функции Ляпунова.

Математические модели роботов в большинстве случаев являются «черным ящиком» с неизвестными для пользователя кинематическими уравнениями и динамическими параметрами [1]. В связи с этим, для получения динамических уравнений системы применяются методы идентификации. В данной работе будет построен идентификатор на основе дифференциальной нейросети [2, 3], в структуру которой входят зависящие от времени весовые матрицы, что дает возможность формировать гибкую структуру модели, которую, в дальнейшем, можно использовать в виртуальной среде для модельных экспериментов и исследования исходной системы на основе ее нейросетевого дубликата.

В качестве модели для исследования выбран многозвеноый робот-манипулятор Fanuc M-2000iA/900L (описание представлено в [1] и [4]) с 6 основными степенями свободы. Модель изначально была построена в SolidWorks, а затем перенесена в Matlab/Simulink с помощью SimLink, связанного с SimMechanics Toolbox. Данная модель содержит все параметрические детали с учетом инерции, размеров и других механических параметров. Стоит отметить, что явная кинематическая модель системы неизвестна, но набор входных состояний можно измерить с помощью инструментов SimMechanics.

Под вектором состояния системы будем понимать набор углов поворота звеньев, как показано на рис. 1. Углы поворота ограничены как

конструктивными особенностями модели, так и динамическими взаимосвязями между звеньями. Учет такого рода ограничений целесообразно задавать в виде изменяющихся во времени функций, а также использовать при построении идентификатора с целью улучшения качества построенной модели.

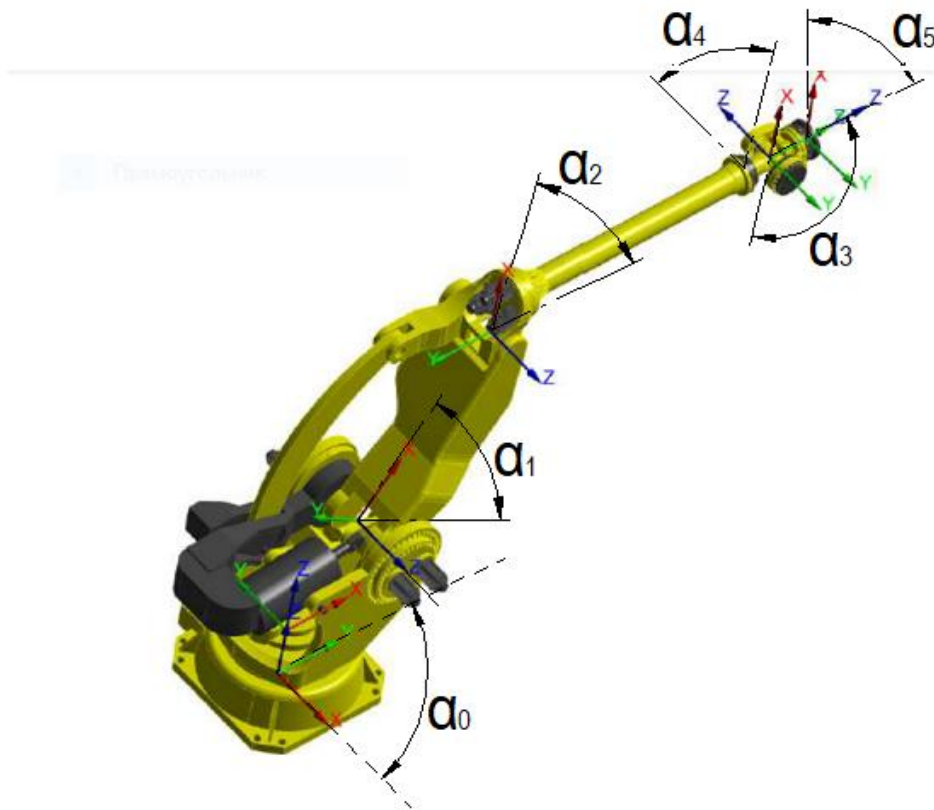


Рис. 1. Робот-манипулятор Fanuc M-2000iA/900L с 6 степенями свободы

В документации производителя указанные на рис. 1 углы соответствуют углам поворота следующих звеньев-револют: угол α_0 – звено 9; α_1 – 12; α_2 – 2; α_3 – 7; α_4 – 3; α_5 – 6.

Запишем модель рассматриваемой система в следующем виде:

$$\frac{d}{dt}x(t) = f(x(t), u(t)) + \xi(x(t), t),$$

где $x \in X \subset R^n$ (в данном случае $n=6$) – вектор состояния, X – открытое множество, $x(0) = x_0, \|x_0\| < \infty$. На состояние системы также накладываются ограничения вида

$$\Omega = \{x(t) \in X: \|x(t)\|^2 < x^+(t) < \infty, \forall t > 0\}.$$

Здесь $x^+(t)$ – известные функции, задающие границы и обладающие следующими свойствами: $x^+(t) \in C^\infty, \left| \frac{dx^+(t)}{dt} \right| \leq dx^+(t) < +\infty, dx^+(t) > 0$.

Возмущения $\xi(x(t), t)$ ограничены и удовлетворяют следующим ограничениям:

$$\|\xi(x, t)\|_{\Lambda_\xi}^2 \leq \gamma_0 + \gamma_1 \|x\|^2, \gamma_0, \gamma_1 \in R_+, \quad 0 < \Lambda_\xi = \Lambda_\xi^\top \in R^{n \times n}.$$

Управление $u(t) \in R^m (m < n)$ – кусочно-постоянная интегрируемая функция из следующего множества:

$$U_{adm} = \{u(t): \|u(t)\|^2 < u_0 + u_1 \|x\|^2, u_0, u_1 \in R_+\}.$$

Для построения идентификатора рассмотрим следующее приближенное представление системы [2]:

$$\frac{d}{dt} x(t) = Ax(t) + W_1^* \Psi_1(x(t)) + W_2^* \Psi_2(x(t))u(t) + \tilde{f}(x(t), u(t)) + \xi(x(t), t),$$

где $A \in R^{n \times n}$ – устойчивая матрица, $W_1^* \in R^{n \times l}$ и $W_2^* \in R^{n \times s}$ – весовые матрицы, $\psi_1(x) \in R^l$ и $\psi_2(x) \in R^{s \times m}$ – функции активации. Ошибка моделирования представлена компонентой $\tilde{f}(x(t), u(t)): R^n \times R^m \rightarrow R^n$:

$$\|\tilde{f}(x, u)\|_{\Lambda_f}^2 \leq f_0 + f_1 \|x\|_{\Lambda_f}^2 + f_2 \|u\|_{\Lambda_f}^2,$$

где $0 < \Lambda_f = \Lambda_f^\top \in R^{n \times n}$ и f_0, f_1, f_2 – известные положительно определенные величины.

Функции активации имеют сигмоидальный вид

$$\psi_{1,r}(x) = \frac{a_r}{1 + b_r e^{(-c_r^\top x)}}, \quad r = \underline{1, l}, \quad \psi_{2,tp}(x) = \frac{a_{tp}}{1 + b_{tp} e^{(-c_{tp}^\top x)}}, \quad t = \underline{1, s}, p = \underline{1, m},$$

$$a_r, a_{tp}, b_r, b_{tp} > 0, c_r \in R^n, c_{tp} \in R^n.$$

Идентификатор в форме дифференциальной нейросети задается в соответствующем аппроксимации виде:

$$\frac{d}{dt} \underline{x}(t) = A\hat{x}(t) + W_1(t)\Psi_1(\hat{x}(t)) + W_2(t)\Psi_2(\hat{x}(t))u(t),$$

$$\hat{x}(t) = \Pi_X\{\underline{x}(t)\}.$$

где $\hat{x}(t) \in R^n$ – вектор состояния, $\underline{x}(t) \in R^n$ – вспомогательная переменная, $\Pi_X\{\underline{x}\}$ – оператор проекции имеющий следующий вид:

$$\Pi_X\{\underline{x}\} = \{x, \quad \text{если } \underline{x} \in \Omega; x^* \in \Omega: x^* = \min_{x \in \Omega} \|x - \underline{x}\|, \text{ если } \underline{x} \notin \Omega\}.$$

С помощью анализа на устойчивость по Ляпунову нулевого положения системы в отклонениях были получены следующие дифференциальные законы изменения весовых матриц:

$$\frac{d}{dt} \widetilde{W}_1(t) = -\frac{2(1 + \kappa)}{k_1 D_m(t)} P_1(t) \Psi_1(\hat{x}(t)) \underline{\Delta}^\top(t),$$

$$\frac{d}{dt} \widetilde{W}_2(t) = -\frac{2(1 + \kappa)}{k_2 D_m(t)} P_1(t) \Psi_2(\hat{x}(t)) u(t) \underline{\Delta}^\top(t),$$

где $\widetilde{W}_i(t) = -W_i(t) + W_i^*$ при $i = 1, 2$, а $\underline{\Delta}(t) = x(t) - \underline{x}(t)$ – ошибка идентификации по отношению к вспомогательной переменной состояния.

При этом матрица $P_1(t)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению Рикатти:

$$\frac{d}{dt}P_1(t) + P_1(t)A_1 + A_1^T P_1(t) + P_1(t)R_1 P_1(t) + Q_1 = 0,$$

где

$$A_1 = A + \frac{\alpha_1}{2} I_n, \quad \alpha_1 = \text{const} > 0,$$

$$R_1 = W_1^+ + W_2^+ + \Lambda_f^{-1} + \Lambda_\xi^{-1},$$

$$Q_1 = \Lambda_{\phi_1} + \Lambda_{\phi_2} (u_0 + u_1 \|x\|^2),$$

$$W_1^* \Lambda_1^{-1} (W_1^*)^T \leq W_1^+, \quad W_2^* \Lambda_2^{-1} (W_2^*)^T \leq W_2^+,$$

где $0 < \Lambda_1 = \Lambda_1^T \in R^{l \times l}$, $0 < \Lambda_2 = \Lambda_2^T \in R^{s \times s}$, $0 < \Lambda_{\phi_1} = \Lambda_{\phi_1}^T \in R^{n \times n}$, $0 < \Lambda_{\phi_2} = \Lambda_{\phi_2}^T \in R^{n \times n}$, $W_1^+ \in R^{n \times n}$, и $W_2^+ \in R^{n \times n}$.

Сформулируем полученный результат в виде теоремы.

Теорема 1. Аппроксимация системы в виде дифференциальной нейросети с указанными выше ограничениями на возмущения $\xi(x(t), t)$ и ошибку моделирования $\tilde{f}(x(t), u(t))$ является достаточной. При условии существования $\alpha_1 > 0$, существует как минимум одно положительно определенное и симметричное решение уравнения Рикатти $P_1(t)$. Оператор проекции обеспечивает выполнение неравенства $\|\hat{x}(t) - x(t)\| \leq \|\underline{\Delta}(t)\|$.

При численном моделировании были использованы следующие начальные данные:

$$\begin{aligned} x(0) &= 0,01 * [0,2; 0,3; 0,1; 0,3; 0,2; 0,2]^T, \\ k_1 &= -0,8 * I, k_2 = -0,5 * I, \\ A &= \text{diag}\{-25; -35; -15; -19; -20; -20\}, \\ P_1(0) &= \text{diag}\{20; 10,2393; 10; 30; 20; 8\}. \end{aligned}$$

Идентифицированная динамика системы представлена на рис. 2. Элементы весовых матриц $\tilde{W}_1(t)$ и $\tilde{W}_2(t)$ изменяются от времени, динамика главных компонент $\tilde{W}_2(t)$ представлена на рис. 3. Этот выбор сделан в силу природы данной матрицы: $\tilde{W}_1(t)$ имеет динамику одинакового порядка для всех компонент, в отличии от $\tilde{W}_2(t)$, где главные компоненты отличны от остальных компонент на 4 порядка. Функции верхних и нижних границ $x^+(t)$ для каждого звена включены в модель SimMechanics для идентификатора с оператором проекции. Общий вид идентификатора без оператора проекции описан в [2, 3].

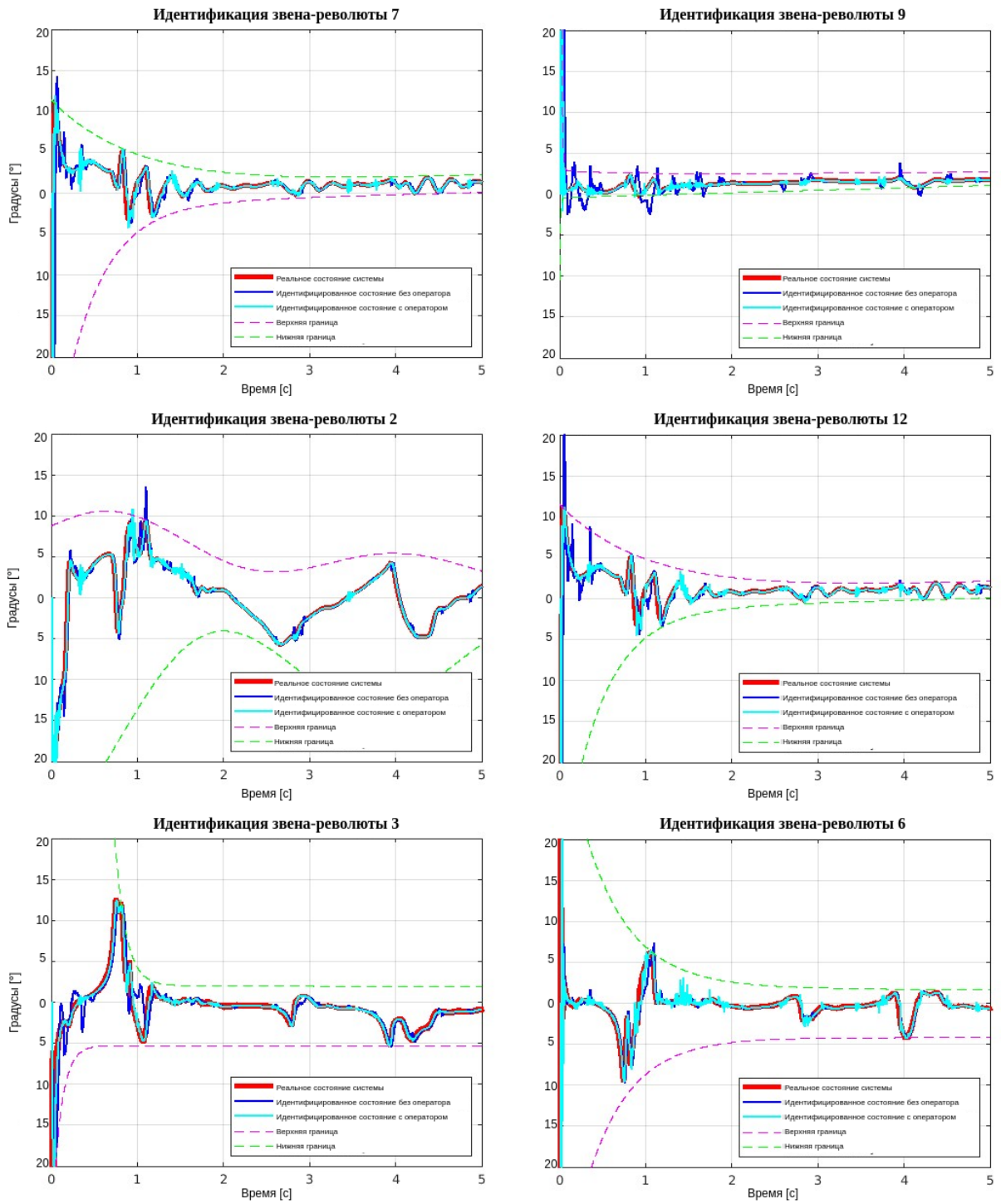


Рис. 2. Исходная и восстановленная динамики системы

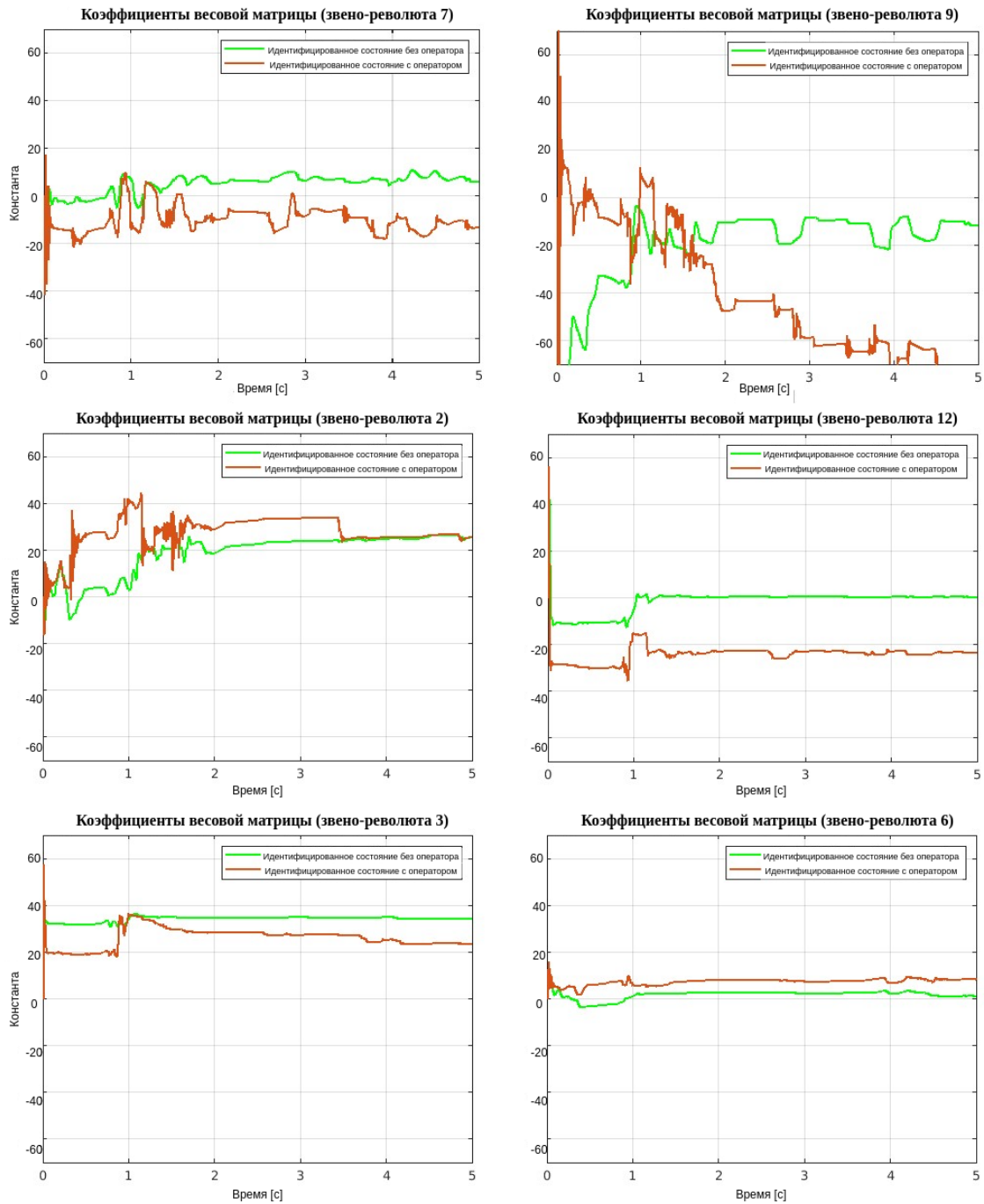


Рис. 3. Главные компоненты весовой матрицы $\tilde{W}_2(t)$ для каждого звена-революты

Метрикой качества выбрана RMSE – корень средне-квадратичной ошибки, заданный следующей формулой:

$$RMSE = \sqrt{\int_{s=0}^t \frac{\|\underline{\Delta}\|^2}{t + \epsilon} ds},$$

где $\epsilon = 0,001$ – положительная константа.

Данные табл. 1 доказывают повышение качества идентификации при применении разработанного метода почти на 21,5% по сравнению идентификатором, не учитывающим динамические ограничения на состояние.

Таблица 1

RMSE для двух типов идентификаторов

Номер звена-революты	RMSE с оператором проекции	RMSE без оператора проекции
7	0,6388	0,7850
9	1,2612	1,5235
2	0,3916	0,4736
12	0,6327	0,7912
3	1,1041	1,2951
6	0,2466	0,3014

Заключение. В данной работе синтезирован идентификатор на основе дифференциальных нейросетей для системы с нестационарными ограничениями на состояние. В качестве модели для численной реализации идентификатора был выбран робот-манипулятор Fanuc M-2000iA/900L с 6 степенями свободы. Разработанная модификация метода идентификации с добавлением оператора проекции позволила увеличить точность идентификации почти на 21,5%. Метрикой для оценивания качества выбран корень среднеквадратичной ошибки.

Библиографический список

1. Nicolescu, A.-F. Forward and inverse kinematics study of industrial robots taking into account constructive and functional parameter's modeling / A.-F. Nicolescu, F.-M. Ilie, T.-G. Alexandru // Proceedings in Manufacturing Systems. – 2015. Vol. 10, Iss. 4. – P. 157–164.
2. Poznyak, A. Differential Neural Networks for Robust Nonlinear Control (Identification, State Estimation and Trajectory Tracking) / A. Poznyak, E. Sanchez, W. Yu. – World Scientific, 2001.
3. Poznyak, T. Ozonation and Biodegradation in Environmental Engineering: Dynamic Neural Network Approach. 1st. edition / T. Poznyak, I. Chairez, A. Poznyak. –Elsevier,-2019.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВКИ КАМЕРЫ ПО ВИДЕОДАНЫМ НА ОСНОВЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КРИВИЗНЫ

Н.О. Носков, В.А. Галкин, А.В. Макаренко

Применение широкоугольных камер в задачах компьютерного зрения обуславливает решение задач калибровки и устранения дисторсии. Данная работа нацелена на модификацию и автоматизацию подходов калибровки камеры с использованием калибровочных паттернов. Для достижения поставленных целей используется: отбор кадров по смазу, формирование множества гипотез – калибровочных параметров и автоматический выбор наилучшего набора параметров на основе кривизны изображения после выравнивания искажений.

Ключевые слова: калибровка камеры, дисторсия, калибровочный паттерн, оценка кривизны.

Введение. Развитие науки и техники, в частности технологий компьютерного зрения привело к возможности решения широкого спектра прикладных задач. Первым этапом в решении задач компьютерного зрения является сбор и обработка данных. Зачастую, для получения данных используют широкоугольные камеры, имеющие большой угол поля зрения и позволяющие полностью «захватывать» наблюдаемую сцену. Использование широкоугольных камер приводит к возникновению дисторсии – искажений, нарушающих геометрическое подобие объекта и его изображения. Наличие такого типа искажений приводит к невозможности решения ряда задач, в которых ключевым признаком являются метрические и геометрические свойства объектов. Таким образом, возникает и актуализируется задача разработки алгоритмов калибровки камер и исправления дисторсии.

Обзор существующих методов. Методы калибровки камер можно разделить на четыре группы: использование калибровочных паттернов, нахождение геометрических примитивов на снимаемой сцене, методы самокалибровки и глубокое обучение.

Методы, основанные на использовании калибровочных паттернов [1], обладают наибольшей точностью, но и имеют ряд недостатков: трудоемкость и низкая скорость сходимости.

Группа методов, базирующихся на нахождении геометрических примитивов [2, 3], требует нахождения на снимаемой сцене определенных геометрических структур, ручного вмешательства и имеет ряд ограничений.

Методы самокалибровки [4] основываются на идее использования

последовательности набора кадров с камеры и оценивании внутренних параметров камеры и ее движения по отснятым изображениям. Основным недостатком данного подхода является необходимость оценки движения камеры, что не всегда является решаемой задачей.

Методы глубокого обучения [5] используют нейронные сети для оценивания подмножества параметров камеры. Так в работе [6] оценивается фокусное расстояние, а в работе [7] параметры радиальной дисторсии. Несмотря на успехи глубокого обучения в компьютерном зрении, использование нейросетевых технологий для калибровки камер имеет ряд ограничений, основным из которых является использование синтетического набора данных и трудности переноса на реальные данные.

Таким образом, методы, использующие калибровочные паттерны, являются наиболее универсальными, и по этой причине будут являться предметом данного исследования. Цель доклада состоит в разработке подхода, позволяющего автоматизировать процесс калибровки камеры с использованием калибровочных паттернов по видеоданным.

Подход и алгоритм. Существуют различные модели дисторсии [8], учитывающие различные типы искажений [9], но некоторые из моделей неприменимы на практике. Следуя работе [10], используем стандартную модель дисторсии.

Разработанный алгоритм калибровки камеры является модификацией классического алгоритма калибровки камеры с использованием калибровочного паттерна [1], который включает в себя следующие этапы:

- 1) отбор кадров по размытию, используя оператор Лапласа [11], и формирование множества наборов точек «мировая система координат – система координат изображения»;
- 2) формирование множества гипотез – наборов калибровочных параметров при повторных запусках с использованием случайных подвыборок;
- 3) выбор «наилучшей» гипотезы путем оценивания кривизны калибровочного паттерна по отобранной подвыборке кадров.

Процесс поиска параметров модели дисторсии происходит путем решения задачи нелинейной оптимизации, основанной на критерии максимального правдоподобия и алгоритме Левенберга-Марквардта [12].

В данной работе в качестве калибровочного паттерна выступает шахматная доска. Для оценивания кривизны формируется набор кадров с вариациями крупного изображения шахматной доски. Для достижения этой цели используется отбор 500 кадров с самыми крупными по площади шахматными досками и последующим исключением коррелированных кадров с использованием меры сравнения SSIM [13].

Оценивание кривизны реализуется путем нахождения коэффициентов полиномов 2-й степени по краевым точкам шахматной доски, которые

после устранения дисторсии преобразуются в прямые линии. В силу выбранного калибровочного паттерна, для оценки кривизны доступны 4 «прямые» – две вертикальные и две горизонтальные (рис. 1).



Рис. 1. Точки калибровочного паттерна, участвующие в оценке кривизны

Для каждой прямой можно записать следующую систему уравнений:

$$x^2 \cdot p_0 + x_0 \cdot p_1 + p_2 = y_0,$$

↓ 0

$$x^2 \cdot p_0 + x_1 \cdot p_1 + p_2 = y_1,$$

(...

$$x_k^2 \cdot p_0 + x_k \cdot p_1 + p_2 = y_k,$$

где k – количество точек шахматной доски, по которым производится оценка коэффициентов полинома; $\{x_0, \dots, x_k\}$, $\{y_0, \dots, y_k\}$ – наборы координат точек, $\{p_0, p_1, p_2\}$ – коэффициенты полиномов.

В связи с формой калибровочного паттерна для оценки кривизны вертикальных линий использовалось 6 наборов точек (x_i, y_i) , где $i \in [1, 6]$. Для оценки кривизны горизонтальных линий использовалось 8 наборов точек (x_i, y_i) , где $i \in [1, 8]$.

Для каждого кадра в полученной выборке кадров формировался вектор из 4-х значений, где каждое значение – это старший коэффициент полинома 2-ой степени, проходящего через соответствующие точки:

$$\begin{aligned} A_1 &= [a^1_1, a^1_2, a^1_3, a^1_4], \\ &\{ \dots \\ A_i &= [a^i_1, a^i_2, a^i_3, a^i_4], \end{aligned} \tag{1}$$

где i – количество кадров выборки.

Для интегрирования оценки производилось усреднение коэффициентов по подмножеству кадров. Таким образом множество наборов (1) можно преобразовать в

$$\bar{A} = [\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{a}_3, \bar{a}_4], \quad (2)$$

где \bar{a}_i – среднее значение коэффициента перед 2-ой степенью полинома для одной из 4-х линий среди всех отобранных кадров в наборе.

Затем на основе суммы коэффициентов сдвиг \bar{A} (2) идет поиск наилучшего набора параметров. Интересует такой набор калибровочных параметров, при котором сумма коэффициентов $\sum^4 \bar{a}_i$ будет наименьшей.

Набор данных. Для эксперимента использовалась широкоугольная камера с разрешающей способностью 2592x1944, частотой съемки 25 кадров в секунду и динамическим фокусным расстоянием $f 3.6 \text{ 11/ F 1.4}$. В качестве калибровочного паттерна использовалась шахматная доска 7×9 с размером ячейки 55 мм.

Данные для калибровки представляют собой 20 минутных роликов, с вариацией: по дистанции съемки, углу наклона калибровочного паттерна и его расположению в плоскости изображения.

Эксперимент и результат. Для выбора наиболее четких кадров использовалось пороговое правило, в качестве порога выступало медианное значение оценки смаза на кадрах. Гистограмма распределения значений смаза в данных приведена на рис. 2.

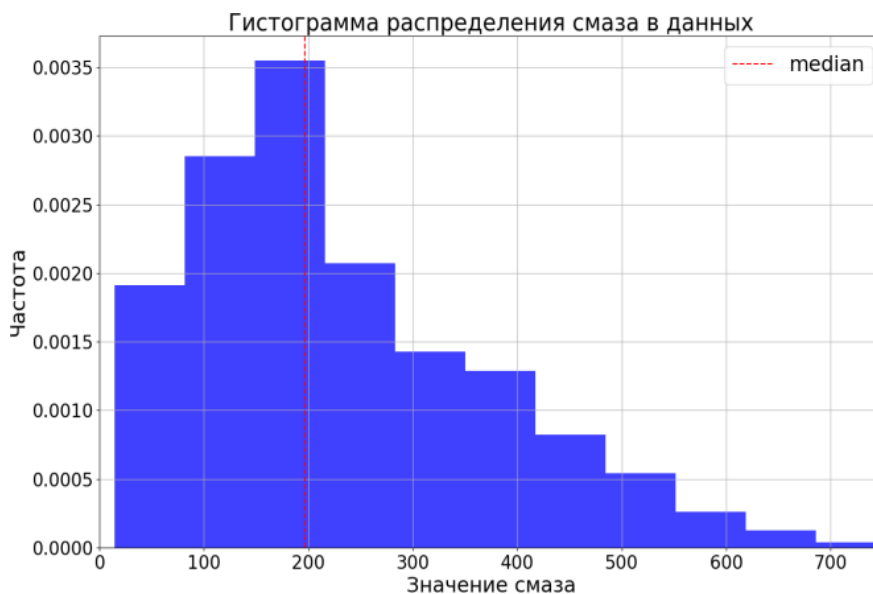


Рис. 2. Гистограмма распределения значений смаза

Следующий этап состоит в формировании точек «мировая система координат – изображение» по отобранным кадрам после оценивания смаза. Распределение в плоскости изображения полученного множества точек представлено на рис. 3.

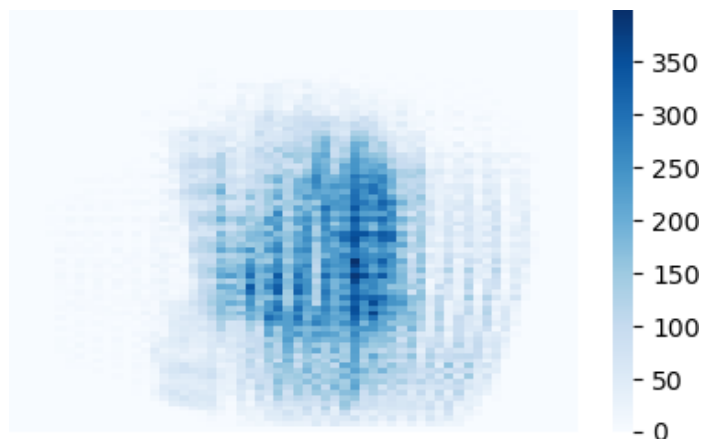


Рис. 3. Распределение точек

Для формирования множества гипотез – наборов калибровочных параметров было выполнено 250 повторных запусков на случайных подвыборках из сформированного множества точек (см. рис. 3). Используемая для калибровки подвыборка состояла из 300 случайных кадров, общее число точек для калибровки 14 400.

Отбор кадров с калибровочным паттерном для оценивания коэффициентов кривизны был реализован следующим образом. По найденным вершинам шахматной доски было отобрано 500 кадров с наибольшей площадью. Из полученной подвыборки с использованием коэффициента структурного подобия SSIM и жадного алгоритма было отобрано 15 кадров с наибольшей площадью. Пороговое значение по метрике SSIM для отсечения 0.7. Распределение суммы средних значений коэффициентов полиномов приведена на рис. 4.

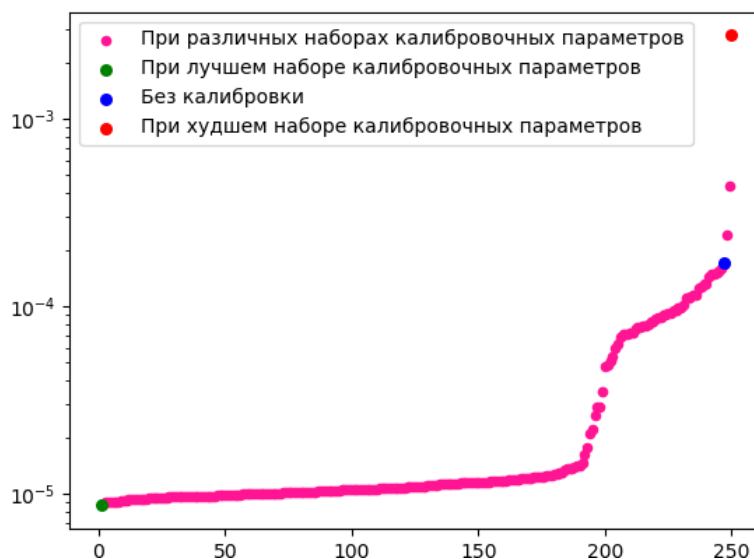


Рис. 4. Распределение суммы средних значений коэффициентов полиномов, отсортированных по возрастанию

В качестве итоговых результатов и визуальной оценки приведен один и тот же кадр с дисторсионными искажениями (слева) и кадр (справа) после исправления дисторсионных искажений (рис. 5).

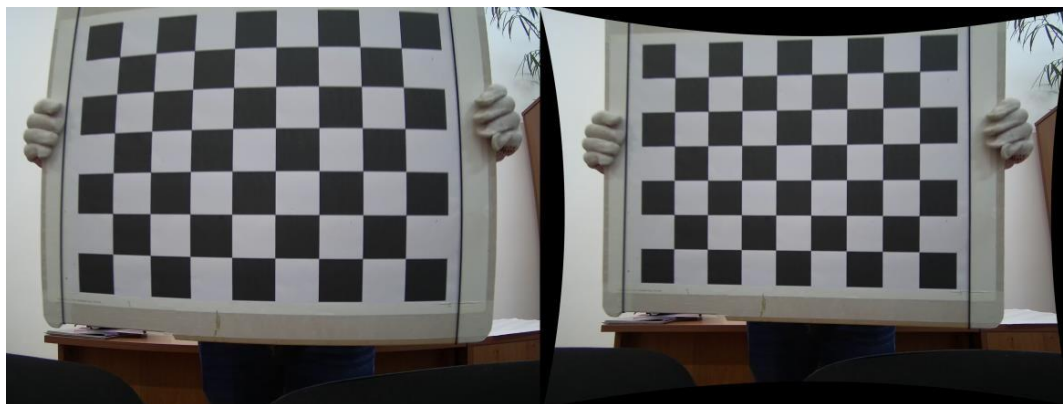


Рис. 5. Кадр слева (с дисторсионными искажениями) и кадр справа (с устранением дисторсионных искажений)

Заключение. В данной работе рассмотрена модификация алгоритма калибровки камеры и устранения дисторсии с использованием калибровочного паттерна, которая позволяет автоматизировать поиск лучшего набора калибровочных параметров. Для достижения поставленных целей использовались: отбор кадров по смазу, формирование множества гипотез –калибровочных параметров и автоматический выбор наилучшего набора параметров на основе кривизны изображения после выравнивания искажений. Предметом дальнейших работ является исследование и разработка оценок качественных характеристик алгоритмов калибровки и устранения дисторсии.

Библиографический список

1. Zhang, Z. A flexible new technique for camera calibration / Z. Zhang // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2000. – Vol. 22, Iss. 11. – P. 1330–1334.
2. Barreto, J.P. Geometric properties of central catadioptric line images and their application in calibration / J.P. Barreto, H. Araujo // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2005. Vol. 27, No. 8. – P. 1327–1333.
3. Zhang, M. Line-based multi-label energy optimization for fisheye image rectification and calibration / M. Zhang, J. Yao, M. Xia, K. Li, Y. Zhang, Y. Liu // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 2015. – P. 4137–4145.
4. Fitzgibbon, A.W. Simultaneous linear estimation of multiple view geometry and lens distortion / A.W. Fitzgibbon // Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. (CVPR, 2001). – IEEE, 2001. – Vol.1.

5. Bogdan, O. DeepCalib: A deep learning approach for automatic intrinsic calibration of wide field-of-view cameras / O. Bogdan, V. Eckstein, F. Rameau, J. Bazin // Proceedings of the 15th ACM SIGGRAPH European Conference on Visual Media Production. – 2018. – P. 1–10.
6. Workman, S. Deepfocal: A method for direct focal length estimation / S. Workman, C. Greenwell, M. Zhai, R. Baltenberger, N. Jacobs // 2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). – IEEE, 2015. – P. 1369–1373.
7. Rong, J. Radial lens distortion correction using convolutional neural networks trained with synthesized images / J. Rong, S. Huang, Z. Shang, X. Ying // Asian conference on computer vision. – Springer, Cham, 2016. – P. 35–49.
8. Ricolfe-Viala, C. Lens distortion models evaluation / C. Ricolfe-Viala, A. Sanchez-Salmeron // Applied Optics. – 2010. – Vol. 49, Iss. 30. – P. 5914–5928.
9. Weng, J. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation / J. Weng, P. Cohen, M. Herniou // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14, Iss. 10. – P. 965–980.
10. Носков, Н.О. Автоматизация алгоритма калибровки камеры с использованием видеопотока / Н.О. Носков, В.А. Галкин, А.В. Макаренко // Материалы Всероссийской студенческой конференции «Студенческая научная весна», посвященной 175-летию Н.Е. Жуковского (Москва, 2022). – М.: Издательский дом «Научная библиотека», 2022. – С. 375–376.
11. Pech-Pacheco, J.L. Diatom autofocusing in brightfield microscopy: a comparative study / J.L. Pech-Pacheco, G. Cristobal, J. Chamorro-Martinez, J. Fernandez-Valdivia // 50 Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition (ICPR-2002). – Vol. 3. – P. 3318.
12. Marquardt, D.W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters / D.W. Marquardt // Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics. – 1963.— Vol. 11, No. 2. – P. 431–441.
13. Wang, Z. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity / Z. Wang, A. Bovik, H. Sheikh, E. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. – 2004. – Vol. 13, Iss. 4. – P. 600–612.

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА РАДИАЦИОННО-СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

В.Д. Онискив, А.Ю. Яковлев

Радиационный синтез является одним из способов изготовления сшитого полиэтилена (СПЭ). Для достижения требуемой степени сшивки необходима длительная процедура облучения полиэтилена. Согласно технологии производства СПЭ, полиэтилен облучается в атмосфере инертного газа (азота). Экспериментально подтверждено, что облучение полиэтилена в атмосфере углеводородных газов (например, в атмосфере ацетилен) позволяет достигнуть требуемой степени сшивки полиэтилена за меньшее время. В статье приведен алгоритм модифицированного производственного процесса производства СПЭ, определены параметры, с помощью которых можно повлиять на скорость течения процесса, приведена постановка задачи оптимизации некоторых этапов производственного процесса.

Ключевые слова: сшитый полиэтилен, радиационная технология, диффузия газа, управление производством.

Введение. Сшитый полиэтилен (СПЭ) нашел свое применение в качестве сырья для изделий в различных областях техники. Этот материал изготавливается из полиэтилена за счет образования в нем поперечных химических связей между макромолекулами полиэтилена. Благодаря такой структурной модификации СПЭ приобретает улучшенные физико-механические свойства, более высокую химическую стойкость, повышенную температуру плавления, эффект памяти формы [1, 2]. Изделия из СПЭ обладают продолжительным сроком службы, а также могут эксплуатироваться в критических условиях. Данный материал используется для изготовления напорных труб холодного и горячего водоснабжения, изоляции кабелей низкого и высокого напряжения, изготовления протезов, имплантов, катетеров термоусаживающихся трубок и антикоррозионных лент.

Количественной характеристикой качества СПЭ является степень его сшивки, которая характеризуется показателем доли гель-фракции [2].

Наиболее распространенными методами изготовления СПЭ являются: радиационная технология, а также пероксидный и силанольный способы [2]. В данной работе будет рассматриваться вопрос об управлении процессом радиационной сшивки полиэтилена. Основным преимуществом радиационного способа является безусловная химическая «чистота» полученного материала, что позволяет снизить токсичность изделий при

изготовлении труб для транспортировки питьевой воды [3], или при использовании СПЭ в качестве материала для протезов.

Кобальт 60 (Co^{60}) используется в качестве источника гамма-облучения [4]. Поскольку процесс радиационного излучения гамма-квантов непрерывен, необходимо оптимизировать процесс производства для наиболее эффективного использования источников на протяжении всего периода их эксплуатации.

Технология процесса производства сшитого полиэтилена. Последовательность операций в процессе изготовления СПЭ радиационным методом изображена на рис. 1. Главной особенностью данного метода является весьма продолжительная процедура облучения материала. Она требует от семи суток до месяца, в зависимости от мощности излучения.

Вместе с тем, экспериментально установлен факт: облучение полиэтилена в атмосфере углеводородных газов позволяет достигать требуемой степени сшивки при существенно меньших поглощенных дозах [5]. Диффундирующие в полиэтилен молекулы углеводородного газа выступают инициаторами формирования поперечных связей, что уменьшает время, необходимое для достижения требуемой степени сшивания.

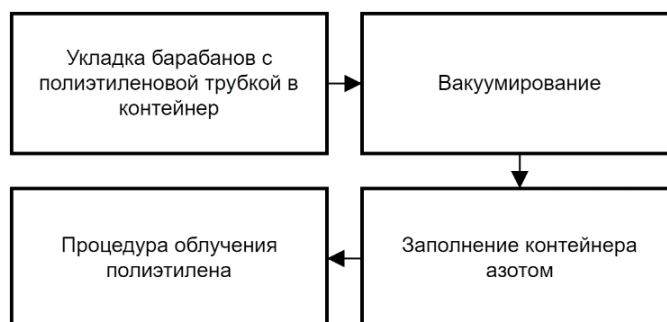


Рис. 1. Схема актуального производственного процесса

На первом этапе процесса производства СПЭ формируются полиэтиленовые ленты, имеющие форму полого цилиндра. В намотанном на барабан виде полиэтилен помещается в герметичные контейнеры.

На следующем этапе производится удаление воздуха из контейнера, что позволяет снизить количество кислорода, абсорбированного полиэтиленом из атмосферы. В процессе облучения кислород взаимодействует с продуктами радиолиза полиэтилена что вызывает окисление полимера и приводит к доминированию процесса деструкции макроцепей над процессом сшивки [6, 7]. Уменьшение концентрации кислорода в полиэтилене снижает интенсивность процесса деструкции и улучшает диэлектрические свойства.

По окончании процедуры удаления воздуха, в контейнеры закачивается азот. Радиационное воздействие производится в атмосфере этого инертного газа. Это связано с необходимостью обеспечения безопасности в ходе облучения полиэтилена, поскольку процесс сопровождается выделением газообразного водорода.



Рис. 2. Предложенная схема производственного процесса

На последнем этапе контейнеры помещаются в радиационную установку. В процессе облучения контейнеры вращаются вокруг своей оси. Источники излучения расположены параллельно оси вращения, что обеспечивает равномерность облучения полиэтилена [4].

Для ускорения производственного процесса изготовления СПЭ предлагается модифицировать алгоритм путем добавления нескольких шагов. Модифицированный алгоритм представлен на рис.2. По окончании этапа удаления воздуха, предлагается выполнить процедуру закачивания ацетилена в контейнер с последующей выдержкой полиэтилена в атмосфере этого газа. В процессе абсорбции некоторая часть ацетилена накапливается в полиэтилене, что в последствии способствует процессу сшивки. При достижении необходимой концентрации ацетилена в полиэтилене, контейнер продувается азотом.

Постановка задачи управления производственным процессом. Управление процессом будет производиться с целью ускорения процесса сшивки. В данном случае рассматривается модифицированный алгоритм производственного процесса. Управлять продолжительностью процесса представляется возможным на следующих этапах: вакуумирование, заполнение контейнера ацетиленом и в процессе облучения.

Критерием окончания процесса изготовления СПЭ является достижение полиэтиленом некоторой требуемой степени сшивки (уровня гель-фракции). Пусть τ – общее время, затраченное на выполнение процесса. Тогда задачу можно сформулировать следующим образом:

$$\tau = t_1 + t_2 + t_3 \rightarrow \min ,$$

где t_1 – время протекания этапа вакуумирования, t_2 – время, затраченное на выполнение этапа насыщения материала ацетиленом, t_3 – время,

затраченное на облучение полиэтилена. Обозначим как $\psi(t)$ - долю гель-фракции в полиэтилене в процессе изготовления СПЭ. Примем за ψ^* требуемую долю гель-фракции. Таким образом, критерием окончания процесса будет являться следующее ограничение:

$$\psi(\tau) \geq \psi^*.$$

Задача оптимизации этапа вакуумирования. Для описания изменения концентрации кислорода в полиэтилене на этапе вакуумирования используется математическая модель диффузии газа в полиэтилене [8]. В силу симметричности геометрической формы полиэтиленовой ленты задачу распространения газа можно считать одномерной. Изменение концентрации кислорода в материале с течением времени описывается вторым законом Фика:

$$\frac{\partial C_{O_2}(x,t)}{\partial t} = D_I \nabla \cdot (\nabla C_{O_2}(x,t)), \quad x \in \Omega,$$

$$C_{O_2}(x,t) = k P(t), \quad x \in \partial\Omega,$$

$$C_{O_2}(x,0) = C_{O_2}^{(0)} = 0, \quad x \in \Omega,$$

$$P(t) = f(C_{O_2}(x,t)), \quad P(0) = 0, \quad x \in \Omega_s$$

где $C_{O_2}(x,t)$ – функция распределения концентрации газа в материале, D_I – коэффициент диффузии, который полагается постоянным, t – время, x – радиус-вектор произвольной точки из Ω , k – константа растворимости, P – парциальное давление газа-пенетранта в контейнере, Ω_s – не содержащая полиэтилен область контейнера. В течение данного процесса свойства материала не изменяются, следовательно, коэффициент диффузии D_I остается неизменным.

Критерием окончания этапа вакуумирования является достижение некоторой средней концентрации кислорода в материале:

$$\frac{\int_0^h C_{O_2}(x,t_1) dx}{h} = C_{O_2}^*,$$

где h – толщина полиэтиленовой ленты.

Предположим, что в некоторый момент времени $t^* \in [0, t_1]$ выполняется повторная откачка воздуха из контейнера. В случае правильного выбора момента времени t^* , динамика процесса диффузии может существенно повыситься. Если зафиксировать параметр $C_{O_2}^*$ и исключить его из задачи управления производственным процессом, то решать задачу оптимизации данного этапа производственного процесса можно обособленно. В таком случае задача будет выглядеть следующим образом:

$$\hat{t}^* \in [0, t_1],$$

$$t_1 = t_1(\hat{t}^*, C_{O_2}^{(0)}, C_{O_2}^*, D_I, k) \rightarrow \min,$$

$$t_1 : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+.$$

На рис. 3 изображены результаты моделирования этапа вакуумирования с выполнением повторной откачки воздуха. Моменты времени t^* выбраны произвольно в целях демонстрации эффективности предложенного подхода – повторное удаление воздуха из свободного объема существенно повышает динамику процесса. Тем не менее, если совершить повторное удаление воздуха слишком рано, требуемая концентрация $C_{O_2}^*$ может оказаться недостижимой.

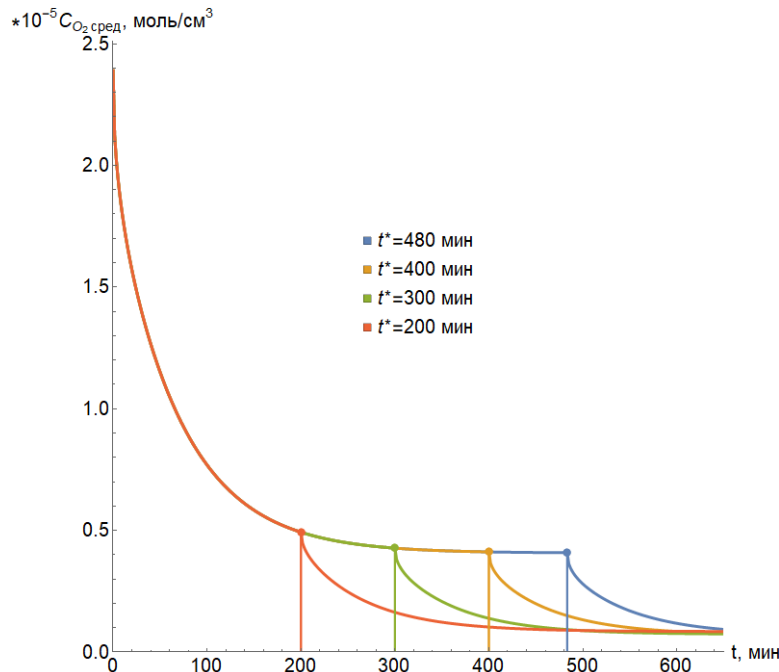


Рис. 3. Изменение средней концентрации кислорода в полиэтиленовой трубке с течением времени в процессе дегазации

Задача оптимизации этапа заполнения контейнера ацетиленом. Для описания данного этапа также воспользуемся математической моделью диффузии газа а полиэтилене [8]:

$$\frac{\partial C_{C_2H_2}(x,t)}{\partial t} = D_{II} \nabla \cdot (\nabla C_{C_2H_2}(x,t)), \quad x \in \Omega,$$

$$C_{C_2H_2}(x,t) = k P(t), \quad x \in \partial\Omega,$$

$$C_{C_2H_2}(x,0) = C_{C_2H_2}^{(0)} = 0, \quad x \in \Omega,$$

$$P(t) = f(C_{C_2H_2}(x,t)), \quad P(0) = P_{C_2H_2}, \quad x \in \Omega_s$$

Считается, что D_{II} не изменяется на протяжении этапа. Критерием окончания данного этапа является абсорбция полиэтиленом некоторой средней концентрации ацетилена:

$$\frac{\int_0^h C_{C_2H_2}(x, t_2) dx}{h} = C_{C_2H_2}^*.$$

Варьируя созданное в контейнере давление ацетилена $P_{C_2H_2}$ и целевую концентрацию ацетилена в полиэтилене $C_{C_2H_2}^*$, можно управлять временем t_2 , необходимым для завершения этапа заполнения контейнера ацетиленом. Таким образом, задача оптимизации данного этапа будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{C_2H_2} &\in [0, P_{\max}], \hat{C}_{C_2H_2}^* \in [0, k \hat{P}_{C_2H_2}], \\ t_2 &= t_2(\hat{P}_{C_2H_2}, \hat{C}_{C_2H_2}^*, D_{II}, k) \rightarrow \min, \\ t_2 &: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^+. \end{aligned}$$

Выбор $C_{C_2H_2}^*$ может существенно повлиять на динамику процесса, протекающего на следующем этапе. На рис. 4 изображены результаты моделирования этапа заполнения контейнера ацетиленом.

Давления ацетилена в контейнере $P_{C_2H_2}$ выбраны произвольно в целях демонстрации эффективности предложенного подхода – увеличение давления способствует повышению динамики процесса диффузии, что позволяет абсорбировать большее количество ацетилена полиэтиленом, или достигнуть требуемую концентрацию $C_{C_2H_2}^*$ с меньшими затратами времени.

Задача оптимизации этапа облучения полиэтилена. На данном этапе рассматривается протекание двух процессов: процесса сшивки под действием радиационного излучения и процесса диффузии ацетилена, абсорбированного полиэтиленом на предыдущем этапе, в свободную область контейнера.

Отклик материала в процессе сшивки предлагается моделировать, описывая эволюцию доли гель-фракции в полиэтилене:

$$\psi(t) = \left(1 + e^{-k_1(t-\tau^*)} \right)^{-1} \cdot (1 + k_2 t)^{-1}, \quad \tau^* = \frac{1}{k_1} \ln(\psi^{-1}(0) - 1),$$

где k_1 – скорость сшивки c^{-1} , k_2 – скорость деструкции c^{-1} .

В силу зависимости скорости сшивки от концентрации абсорбированного ацетилена в полиэтилене, скорость сшивки является некоторой функцией от текущей концентрации ацетилена в материале:

$$k_1 = k_1(C_{C_2H_2}(t)) .$$

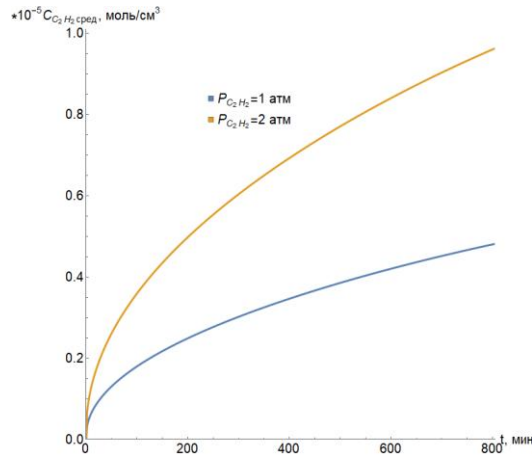


Рис. 4. Изменение средней концентрации ацетилена в полиэтиленовой ленте с течением времени на этапе заполнения контейнера ацетиленом

Концентрация ацетилена в полиэтилене, в свою очередь, убывает по нескольким причинам: градиент перепада концентраций ацетилена в полиэтилене и концентрации газа в свободном объеме контейнера активизирует процесс диффузии, а также часть абсорбированного ацетилена расходуется в процессе протекания радиационно-химических реакций. Для описания такого поведения ацетилена математическую модель диффузии необходимо уточнить:

$$\frac{\partial C_{C_2H_2}(x,t)}{\partial t} = D_{III}(t) \nabla \cdot (\nabla C_{C_2H_2}(x,t)) - k_r C_{C_2H_2}(x,t), \quad x \in \Omega,$$

$$C_{C_2H_2}(x,t) = k P(t), \quad x \in \partial\Omega,$$

$$C_{C_2H_2}(x,0) = C_{C_2H_2}^{(0)} = \hat{C}_{C_2H_2}^*, \quad x \in \Omega,$$

$$P(t) = f(C_{C_2H_2}(x,t)), \quad P(0) = 0, \quad x \in \Omega_s$$

где k_r характеризует интенсивность протекания радиационно-химических реакций с участием абсорбированного ацетилена. В процессе радиационной сшивки имеет место существенное изменение структуры полиэтилена, следовательно коэффициент диффузии ацетилена D_{III} будет изменяться с течением времени:

$$D_{III} = D^* (1 - \xi(\psi)),$$

где ξ – доля кристаллической фазы, D^* – коэффициент диффузии ацетилена в аморфной фазе полиэтилена. Критерием окончания данного этапа является достижение требуемой степени сшивки: $\psi(t_3) \geq \psi^*$.

Сложностью оптимизации данного этапа является существенная зависимость от параметра $\hat{C}_{C_2H_2}^*$.

Заключение. В статье приведен алгоритм модифицированного производственного процесса производства СПЭ с использованием радиационного способа изготовления. Описаны параметры, влияющие на скорость протекания процесса изготовления СПЭ. Для нескольких этапов производственного процесса сформулированы задачи оптимизации. Приведены результаты математического моделирования данных этапов производственного процесса, позволяющие судить о потенциальной эффективности предложенных модификаций алгоритма производственного процесса. В дальнейшем, полученные данные позволят сформулировать задачу оптимизации процесса в целом и перейти к анализу влияния значений параметров на скорость протекания производственного процесса.

Библиографический список

1. Князев, В.К. Облученный полиэтилен в технике / В.К. Князев, Н.А. Сидоров. – М.: Химия, 1974. – 374 с.
2. Скрозников, С.В. Закономерности формирования структурно-механических свойств сшитых полиолефинов для кабельной техники дисс... канд. техн. наук / С.В. Скрозников. – Москва, 2015. – 149 с.
3. Holder, S.L. Understanding and modelling the diffusion process of low molecular weight substances in polyethylene pipes / S.L. Holder, M.S. Hedenqvist, F. Nilsson // *Water Research*. – 2019. – Vol. 157. – P. 301–309.
4. Онискив, В.Д. Об одной задаче управления процессом гамма-облучения полиэтиленов / В.Д. Онискив, В.Ю. Столбов, Р.К. Хатямов // *Прикладная математика и вопросы управления*. – 2019. – №3. – С. 119–130.
5. Appleby, R.W. Property modification of polyethylene tapes by acetylene-sensitized gamma irradiation / R.W. Appleby, W.K. Busfield // *Journal of Materials Science*. – 1994. – Vol. 29, Iss. 1. – P. 151–156.
6. Sargin, I. Modelling the effect of dose rate and time on crosslinking and scission in irradiated polyethylene / I. Sargin, S.P. Beckman // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. – 2020. – Vol. 27, Iss. 3 – P. 731–738.
7. Appleby, R.W. Post-gamma irradiation cross-linking of polyethylene tape by acetylene treatment / R.W. Appleby, W.K. Busfield // *Journal of Materials Science*. – 1994. – Vol. 29, Iss. 1 – P. 227–231.
8. Онискив, В.Д. Некоторые результаты решения нестационарной задачи диффузии газа в полиэтилене / В.Д. Онискив, А.Ю. Яковлев // *Прикладная математика и вопросы управления*. – 2021. – №2. – С. 41–51.

КОРРЕКТИРОВКА РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ СТАЛЬНОГО ПРОКАТА ДЛЯ ЭМАЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МАРКОВСКИХ ПРОЦЕССОВ

Е. Н. Ширяева, М.А. Полякова

В статье рассмотрены особенности охлаждения стального проката для эмалирования в ходе технологического процесса его производства. Приведен пример прогнозно-управляемой модели поведения объекта и групп объектов на основе статистических данных, по результатам эксплуатационных наблюдений. Представлена модель со структурой, позволяющая определить вероятность попадания объекта за определенный интервал времени в одно из состояний процесса. Исследована возможность использования математического аппарата марковских цепей для прогнозирования попадания показателей свойств металлопроката в заданный интервал.

Ключевые слова: технологический процесс, стальной прокат, неопределенность информации, Марковский процесс.

При проектировании технологических процессов важно понимать взаимосвязи между измеряемыми параметрами процесса производств и функциями получаемого изделия, необходимыми потребителям [1, 2]. Рассматривая процесс производства металлопродукции, необходимо определять входные и выходные параметры системы, а также влияние потоков информации на выпуск годной продукции в ходе производственного процесса производства стальной полосы.

В сложных многостадийных системах металлургического производства входными параметрами процесса можно считать характеристики заготовки, регламентированные в нормативной и технической сопровождающей документацию (рис. 1). Характеристики готовой продукции, отражающие требования, предъявляемые заказчиком, являются выходными параметрами технологической системных [3–4]. Например, к ним можно отнести допуски толщины и длины стального проката, требования к поверхности, качество смотки рулонов, а также механические свойства. В процессе производства стального проката система оказывается под влиянием различных потоков энергии (электрическая, акустическая, тепловая, химическая, механическая). Потоками информации могут быть не только различные требования к заготовке, нормируемые документацией, но и предъявляемые экологической и промышленной безопасностью, охраной труда и сведения, получаемые при различных видах контроля.

В зависимости от входных и выходных параметров могут формулироваться задачи дальнейших исследований. Из-за наличия ряда значимых факторов, неизбежно возникающих в процессе производства стальной полосы, поставленные задачи решаются в условиях неопределенности [5].

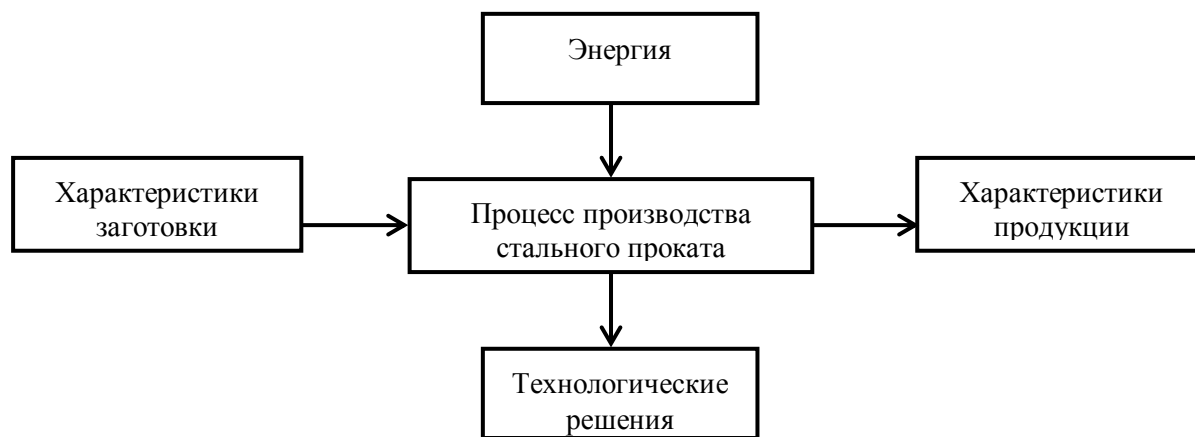


Рис. 1. Условная схема технологического процесса прокатки стальной полосы

Для поддержания работоспособного состояния технологической системы значения показателей качества и параметров изготавливаемой продукции, производительности, стоимостных и материальных затрат на ее изготовление должны соответствовать требованиям, установленным в технологической, конструкторской и других видах нормативной и технической документации [6]. Если же данное условие не выполняется, то появляется необходимость принятия технологического решения в виде комплекса мероприятий, направленных на решение конструктивных, инженерных, проектных решений, учитывая все особенности технологических процессов, реализуемых в нем.

Показатели качества выпускаемой продукции с глубокой степенью переработки нормируются как определенными стандартами, нормативными документами, так и дополнительными требованиями потребителей. При этом такие требования зачастую бывают труднодостижимыми в процессе производства или дальнейшей переработки либо же не в полной мере отвечают положениям стандартов. Заданные характеристики готовых изделий напрямую зависят от их физико-механических свойств. Следовательно, совершенствуя технологию получения листового проката с заданным уровнем механических свойств, сложную многопроходную технологическую систему можно рассматривать как причинно-следственную связь состояний.

Постоянное воздействие различных факторов на механические свойства листового проката может приводить к случайным изменениям технического

состояния системы. Марковские процессы — это частный случай случайных процессов, имеющих место при эксплуатации сложных технических систем. Анализируя надежность таких систем, выясняется, что вследствие отказов и восстановлений ее элементов, функционирование их рассматривается чаще как случайный процесс перехода системы из одного состояния в другое. Учитывая определенные условия, этот процесс можно довольно строго описать дискретным марковским процессом с конечным числом состояний и непрерывным временем [7-8]. Аналитический аппарат марковских процессов позволит проанализировать влияние технологических факторов на потребительские свойства полосы.

Рассматривая конкретную сквозную технологию производства металлопроката в условиях действующего металлургического предприятия для дальнейшей переработки в эмалированные изделия, выяснилось, что прокат не всегда отвечает установленным потребителями требованиям по показателю водородного охрупчивания (ПВО), что в дальнейшем приводит к образованию на готовом изделии дефекта «рыбья чешуя». Это происходит вследствие уменьшения пластичности или вязкости прокатанного металла из-за присутствия на его поверхности атомарного водорода.

В рамках исследования технологии производства металлопроката для эмалирования был определен показатель водородного охрупчивания холоднокатаного проката. Для набора статистических данных и подтверждения сходимости показателя водородного охрупчивания и оценки склонности металлопроката для эмалирования к образованию дефекта «рыбья чешуя» был выполнен комплекс металлографических исследований. В результате была обнаружена следующая тенденция: при значениях ПВО ниже 40 % (при норме 40-80 %) объемная доля структурно-свободного цементита не превышает 2,3-2,5 % (норма 2,7-3,6 %). По полученным результатам была произведена первичная обработка экспериментальных данных. Исходя из полученных значений была введена в рассмотрение функция Лапласа, определяющая вероятность попадания случайной величины, распределенной по нормальному закону, в заданный интервал. В нашем случае, оценивая изменения параметров состояния контролируемых свойств в ходе сквозного технологического процесса прокатки стального листа, можно определить четыре состояния системы:

S_1 – соответствие заданным свойствам (то есть полное попадание всех показателей в заданный интервал);

S_2 – частичное соответствие заданным свойствам (несоответствия не превышают 2%);

S_3 – частичное несоответствие заданным свойствам (полученные неудовлетворительные результаты испытаний превышают 2%);

S_4 – несоответствие заданным свойствам (полученные значения полностью выходят за установленный диапазон).

Переход системы из одного состояния в следующее непрерывно и имеет случайный характер. Переходы возможны в фиксированные моменты времени, определяющиеся контролем состояния параметров системы в строго определенном интервале времени и за конечное число шагов, что может означать существование предельных вероятностей [9-11]. Полученный набор статистических данных и рассчитанная вероятность попадания случайной величины в заданный интервал позволяют задать значения матрицы вероятностей переходов для построения размеченного графа состояний системы.

В данной системе имеется вероятность перехода из одного состояния в следующее за конечное число шагов, что предполагает наличие предельных вероятностей. Матрица переходов будет иметь вид

$$P = |p_{ij}| = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Поскольку после первого перехода система окажется в одном из трех возможных состояний, следовательно, сумма вероятностей в каждой строке будет равна единице, то есть матрица вероятностей может считаться стохастической [10].

В полученной матрице P прогнозированных вероятностей каждый элемент p_{ij} показывает вероятность перехода из состояния i в состояние j .

Рассчитав значение попадания случайной величины в заданный интервал (p_{11}) и исходя из обработки статистических данных, назначаются остальные элементы матрицы:

$$\begin{aligned} p_{11}=0,03, p_{12}=0,2, p_{13}=0,3, p_{14} = 0,47; \\ p_{21}=0,2, p_{22}=0,03, p_{23}=0,2, p_{24}=0,57; \\ p_{31}=0,3, p_{32}=0,2, p_{33}=0,1, p_{34}=0,4; \\ p_{41}=0,47, p_{42}=0,5, p_{43}=0,01, p_{24}=0,02. \end{aligned}$$

Таким образом, для наглядности мы можем получить размеченный граф состояний, где состояния S изображаются в кружочке, а возможные переходы стрелками, на которых цифрами выставляются вероятности этих переходов (рис. 1).

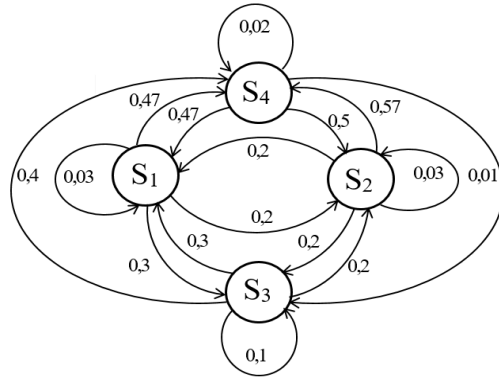


Рис. 1. Размеченный граф состояний и переходы состояний технологической системы производства стального проката для эмалирования для оценки его склонности к образованию дефекта «рыбья чешуя»

При условии $pR=p$, $p=(p_1, p_2, p_3)$, $\sum p_i=1$, финальные вероятности достижения требуемого уровня значений показателей проката, производящегося по действующей на производстве технологии будут иметь вид

$$\begin{cases} p_1 = 0.260 \\ p_2 = 0.257 \\ p_3 = 0.148 \\ p_4 = 0.335. \end{cases} \quad (2)$$

Это означает, что система (S) в предельном режиме будет находиться с вероятностью в 26% в состоянии S₁, 25,7% вероятность того, что будет в состоянии S₂, 14,8% – система попадает в состояние S₃ и целых 33,5% вероятности того, что в состоянии S₄. Определение данных закономерностей показывает то, что при используемых технологических режимах в действующих условиях производства не обеспечивается формирование требуемых свойств готовой продукции [12-13], а, следовательно, получение годного металлопроката по показателю ПВО. Это связано с работой системы охлаждения на отводящем рольганге, в частности, со схемой включения охлаждающих секций, а также скоростными параметрами прокатки в последней катающей клетки. Это обусловлено тем, что ранее в качестве основной схемы включения охлаждающих секций был предложен некорректный код охлаждения, предусматривающий включение верхних и нижних секций системы охлаждения, начиная с 24 по 30 секции, что не обеспечивало формирование микроструктуры с равномерным баллом цементита. Соответственно, это являлось причиной появления дефекта «рыбья чешуя» при эмалировании данного стального проката у потребителя.

На этом основании был проведен анализ температурно-скоростных условий и влияния схемы охлаждения при горячей прокатке

металлопроката на показатель водородного охрупчивания. Анализ проводился путем сравнения годных и «провальных» партий по показателю ПВО, который выявил необходимость корректировки технологических режимов охлаждения. На этом основании были разработаны рекомендации по производству проката, основанные на корректировке температурно-скоростных условий прокатки.

После выполнения корректировки технологических параметров изготовления стального проката в условиях действующего производства снова был проведен комплекс металлографических исследований. Результаты производства опытных партий металлопродукции и эмалированных изделий были проанализированы, на основании чего аналогично вышеприведенным расчетам был построен размеченный граф состояний и переходы состояний технологической системы, а также найдены финальные вероятности.

Были получены следующие новые значения вероятностей перехода из состояния i в состояние j :

$$\begin{aligned}
 p_{11} &= 0,98, p_{12} = 0,01, p_{13} = 0,01; \\
 p_{21} &= 0,01, p_{22} = 0,98, p_{23} = 0,005, p_{24} = 0,005; \\
 p_{31} &= 0,2, p_{32} = 0,2, p_{33} = 0,5, p_{34} = 0,1; \\
 p_{41} &= 0,01, p_{42} = 0,5, p_{43} = 0,01, p_{44} = 0,39.
 \end{aligned}$$

Исходя из полученных данных, был построен новый размеченный граф состояний и их переходы для технологии изготовления металлопроката после внедрения новых технологических параметров охлаждения (рис. 2).

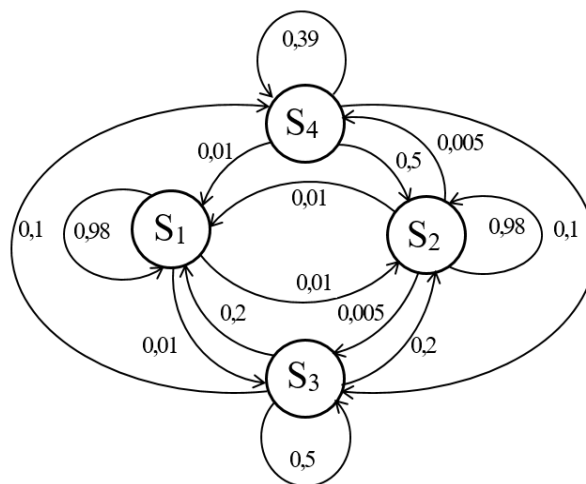


Рис. 2. Размеченный граф состояний и переходы состояний технологической системы производства стального проката для эмалирования после внедрения корректирующих мероприятий по охлаждению

Финальные значения вероятностей в этом случае будут выглядеть следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1 = 0.431 \\ p_2 = 0.546 \\ p_3 = 0.016 \\ p_4 = 0.007. \end{array} \right. \quad (3)$$

То есть система (S) в предельном режиме с вероятностью в 43,1% будет находиться в состоянии S_1 , 54,6% с вероятностью того, что будет в состоянии S_2 , 1,6% составит вероятность, что система попадет в состояние S_3 и всего 0,7% в состояние S_4 . Таким образом, технологические режимы, по которым были произведены опытные партии стального проката, позволили получить нормируемые показатели свойств, необходимых для получения качественных эмалированных изделий. Полученные результаты по механическим свойствам и показателю водородного охрупчивания оказались удовлетворительными в пределах нормируемых диапазонов.

Данные закономерности показывают возможность обеспечения вероятности формирования свойств готовой продукции и влияние их на разработку режимов в действующих производственных условиях.

Заключение. Сквозной технологический процесс производства металлоизделий подразумевает под собой большой массив информации, который необходим для его разработки, который может усложнять прогнозирование получения продукции, удовлетворяющей всем требуемым свойствам заказчика. Теория же случайных процессов связана с изучением случайных явлений в динамике их развития. Такой подход потребовался для решения конкретной технологической задачи. От попадания системы в соответствующее состояние зависит скорость реакции на изменение входных параметров, точность и обоснованность принятого технологического решения. Использование вероятностного подхода для математического моделирования процесса производства стального листа дает гарантию обеспечения технологического режима для получения металлопродукции с заданным комплексом свойств.

Библиографический список

1. Рубин Г.Ш., Данилова Ю.В., Полякова М.А. Системный анализ в стандартизации. Стандартизация как форма взаимодействия систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 4. – С. 100–105.
2. Голубчик Э.М. Адаптивное управление качеством металлопродукции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – № 1. – С. 63–69.
3. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1982. – 232 с.
4. Кузнецов В.И., Барзилович Е.Ю. Надежность и эффективность в технике: справочник. Том 8. Эксплуатация и ремонт / Под ред. В.И. Кузнецова, Е.Ю. Барзиловича. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.

5. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М.: Советское радио, 1977. – 488 с.
6. Струков А.В. Анализ международных и российских стандартов в области надежности, риска и безопасности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: - http://szma.com/standarts_analysis.pdf Дата обращения 01.08.2021.
7. Ховард Р.А. Динамическое программирование и марковские процессы / Пер. с англ. В.В. Рыкова, под ред. Н.П. Бусленко. М.: Советское радио, 1964. 189 с.
8. Сизова К.Г., Скоробогатов П.К., Прыгунов М.О. Применение методов анализа надежности и риска при обеспечении, прогнозировании и оценке радиационной стойкости РЭА // Безопасность информационных технологий. – 2018. – Том 25. - № 1. – С. 52–64.
9. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М.: Советское радио, 1977. – 488 с.
10. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. Литературы, 1981. – 448 с.
11. Хубка В. Теория технических систем: пер. с нем. – М.: Мир, 1987. – 208 с.
12. Ширяева Е.Н., Полякова М.А. Особенности оценки надежности технологических и технических систем в действующей нормативной документации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2019. – Т.17.— №3. – С. 60–69.
13. Ширяева Е.Н., Полякова М.А., Голубчик Э.М. Предпосылки выбора метода оценки надежности технологического процесса горячей прокатки // Современные инновации в области науки, технологий и интеграции знаний: сборник материалов юбилейной международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Рудненского индустриального института. – Рудный: Рудненский индустриальный институт, 2019. – С. 596-604.

МЕХАНИКА ТОКОПРОВОДЯЩИХ СПЛОШНЫХ СРЕД

Е.А. Рябушев

Предложен подход к механике сплошных сред в электромагнитном поле на основе термодинамических симметрий. На его основе получены уравнение состояния и материальные соотношения для таких сред. Результирующие уравнения движения записаны в инвариантном виде для произвольного гладкого многообразия.

Ключевые слова: гидродинамика, электромагнетизм, симметрии, дифференциальные уравнения, гладкие многообразия.

Механика сплошных сред, способных пропускать электрический ток, имеет множество приложений. Например, в области термоядерного синтеза для описания высокотемпературной плазмы в токамаках и стеллараторах [1]. Описание таких сред требует совместного использования уравнения электродинамики и гидродинамики. Магнитная гидродинамика является одной из самых простых теорий, описывающих подобные системы. Она рассматривает плазму как идеальный политропный газ с линейным законом Ома [2]. Однако данная теория обладает рядом недостатков, никак не учитывая структуру вещества плазмы. Например, плотность тока, предсказываемая магнитной гидродинамикой, часто заметно расходится с экспериментом [2]. Поэтому ее иногда называют теорией псевдо-плазмы, поскольку она описывает вещество, которого на самом деле не существует.

Наша работа предлагает другой подход к описанию термодинамики сплошных сред на основе их симметрий. Сплошная среда исследуется нами на гладком трехмерном многообразии M , снабженном метрикой g . Термодинамика определяет в каждой точке $a \in M$ соотношение между экстенсивными и интенсивными переменными среды. Экстенсивными переменными являются плотности внутренней энергии, массы и деформации ε , ρ и Δ , электрическая и магнитная индукции D и B . А интенсивными – двойственные к ним химический потенциал γ , натяжение σ и электрическая и магнитная напряженности E и H . Естественно предположить, что термодинамика не зависит от точки $a \in M$, что равносильно гипотезе о локальном клеточном равновесии среды. Поэтому оказывается удобным ввести фазовое пространство [3]

$$\Phi = R^5 \times \text{End}(T) \times \text{End}(T^*) \times T^* \times \Lambda^2(T) \times T^* \times \Lambda^2(T),$$

где переменные $(\varepsilon, \theta, s, \gamma, \rho, \sigma, \Delta, E, D, H, B)$ служат координатами. Причем $(\varepsilon, \theta, s, \gamma, \rho) \in R^5$ – скаляры, $\Delta \in \text{End}(T)$ – линейный оператор на $T \cong TM_a(M)$, $\sigma \in \text{End}(T^*)$ – оператор на сопряженном пространстве T^* , $E \in T^*$ и $H \in T^*$ – 1-формы, а $D \in \Lambda^2(T)$ и $B \in \Lambda^2(T)$ – косые 2-формы.

Термодинамически допустимые состояния системы образуют в пространстве Φ некоторое многообразие L . Первое начало термодинамики требует, чтобы дифференциальная форма

$$\omega = \theta ds - d\varepsilon + \gamma d\rho + \sigma \cdot d\Delta + *(E \wedge dD + H \wedge dB)$$

обращалась бы в нуль на этом многообразии. Здесь $\sigma \cdot d\Delta = \text{Tr}(\sigma^* \Delta)$, σ^* – сопряженный к σ оператор, $*$ – звезда Ходжа для метрики g , а \wedge – символ внешнего умножения. Таким образом, L оказывается максимальным интегральным многообразием $L: \omega|_L = 0$. Введем на L функцию свободной энергии Гельмгольца $h = \varepsilon - s\theta$, такую что

$$dh = -sd\theta + \gamma d\rho + \sigma \cdot d\Delta + *(E \wedge dD + H \wedge dB),$$

тогда на термодинамическое состояние L может быть задано соотношениями

$$\gamma = \frac{\partial h}{\partial \rho}, \sigma = \frac{\partial h}{\partial \Delta}, *E = \frac{\partial h}{\partial D}, *H = \frac{\partial h}{\partial B}, \quad (1)$$

которые играют роль уравнений состояния для проводящей среды в электромагнитном поле.

Жидкость – изотропная среда, поэтому она локально симметрична относительно группы вращений $O(g) \subset GL(T)$, где $GL(T)$ – линейные преобразования пространства $T = TM(M)$ [1]. Действие $O(g)$ на T продолжается на Φ , если предположить, что оно тривиально на $R^5 = (\varepsilon, \theta, s, \gamma, \rho)$ и естественно на

$$\text{End}(T) \times \text{End}(T^*) \times T^* \times \Lambda^2(T) \times T^* \times \Lambda^2(T).$$

Поскольку функция $h(\theta, \rho, \Delta, D, B) = \varepsilon - s\theta$ является скалярной, то она должна быть $O(g)$ -инвариантом. Однако в таком случае она может зависеть от (Δ, D, B) лишь только через их инвариантные комбинации.

Пусть Δ^* – сопряженный к Δ оператор тогда алгебра полиномиальных $O(g)$ -инвариантов согласно теореме Прочесси [4] порождена инвариантами Артина

$$P_{\alpha, \beta, \chi, \delta}(\Delta, \Delta^*, B, D) = \text{Tr}(\Delta^{\alpha_1} \Delta^{*\beta_1} B^{\chi_1} D^{\delta_1} \dots \Delta^{\alpha_m} \Delta^{*\beta_m} B^{\chi_m} D^{\delta_m}),$$

где $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)$, $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_m)$, $\chi = (\chi_1, \dots, \chi_m)$, $\delta = (\delta_1, \dots, \delta_m)$ – мульти-индексы, такие что $\sum_{i=1}^m (\alpha_i + \beta_i + \chi_i + \delta_i) \leq 2^n - 1$.

Соотношение (6) связывают натяжение σ с деформацией Δ , магнитную напряженность H с магнитным полем B , электрическую индукцию D с электрическим полем E . Обычно эта связь полагается линейной, что равносильно гипотезе о том, что свободная энергия h – содержит не более чем квадратичные члены по (Δ, D, B) . В таком случае, в силу теоремы Прочесси функция Геймгольца h принимает следующий вид

$$h = \frac{1}{2} [a \text{Tr}(\Delta^2) + b \text{Tr}(\Delta \Delta^*) - 2c \text{Tr}(\Delta B) - 2k \text{Tr}(\Delta D) + l \text{Tr}^2(\Delta) - \frac{f}{2} \text{Tr}(B^2) - \frac{v}{2} \text{Tr}(D^2) - r \text{Tr}(BD)] + p \text{Tr}(\Delta) + w,$$

где $a, b, c, k, ef, v, r, p, w$ – некоторые гладкие функции от (θ, ρ) . В таком случае, уравнения (1) приводят к соотношениям

$$\sigma = \alpha(\rho, \theta) \Delta^* + \beta(\rho, \theta) \Delta + \zeta(\rho, \theta) \hat{B} - \chi(\rho, \theta) \hat{D} + (l(\rho, \theta) \text{Tr}(\Delta) + p(\rho, \theta)) \hat{I}, \quad (2)$$

где \hat{I} – единичный оператор,

$$D = \varsigma(\rho, \theta) * E + \xi(\rho, \theta) B + \chi(\rho, \theta) \Delta_{alt} \quad (3)$$

и

$$H = \mu^{-1}(\rho, \theta) * B - \xi(\rho, \theta) E + \zeta(\rho, \theta) * \Delta_{alt}, \quad (4)$$

где Δ_{alt} – косая 2-форма, соответствующая матрице оператора $(\Delta - \Delta^*)/2$, а коэффициенты определены равенствами

$$\varsigma = \frac{1}{v}, \xi = -\frac{r}{v}, \chi = -\frac{k}{v}, \mu^{-1} = \frac{fv - r^2}{v}, \zeta = \frac{rk - cv}{v}, \alpha = \frac{av + k^2}{v}, \beta = \frac{bv - k^2}{v}.$$

Величины α , β и l играют роль вязкостей, p – гидравлического давления, ς , μ , ξ , χ и ζ – диэлектрических проницаемости, магнитной восприимчивости среды и других коэффициентов, описывающих взаимодействие поля с веществом. В дальнейшем будем рассматривать лишь среды, удовлетворяющие нашим предположениям о симметрии и квадратичности.

Для таких сред равенства (2-4) играют роль уравнения состояния и материальных соотношений, связывающих (D, B) с (E, H) .

Уравнения движения сплошной среды по существу выражают сохранение массы, заряда, импульса и энергии. Введем оператор субстанциональной производной

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \nabla_{\mathbf{X}},$$

где ∇ – связность Леви-Чивиты метрики g , а $\mathbf{X} \in TM(M)$ – векторное поле скоростей жидкости. Также нам потребуется определить дивергенцию, что для векторного поля $\mathbf{Y} \in TM(M)$ можно сделать с помощью равенства $L_{\mathbf{Y}}(\Omega_g) = (\text{div } \mathbf{Y})\Omega_g$, где Ω_g – форма объема, соответствующая римановой метрике g на многообразии M . В работе [3] было показано, что оператор дивергенции аналогично может быть определен по формуле

$$\text{div } \mathbf{Y} = \text{Tr}(d_{\nabla} \mathbf{Y}).$$

Действительно, в координатах

$$d_{\nabla} \mathbf{Y} = \sum_{i,j} \left(\frac{\partial Y_i}{\partial x_j} + \sum_k \Gamma_{kj}^i Y_k \right) \frac{\partial}{\partial x_i} \otimes dx_j,$$

где Y_i – компоненты поля \mathbf{Y} вдоль базиса $\frac{\partial}{\partial x_i}$, а Γ_{kj}^i – символы Кристоффеля второго рода. Соотношение (15) очевидно выполняется в нормальных координатах x_1, x_2, x_3 , а значит верно и в общем случае. Это позволяет обобщить дивергенцию на случай произвольного линейного оператора A :

$$\text{div } A = c_{1,3}(d_{\nabla} A),$$

где $c_{1,3}$ означает (1,3)-свертку по первому и третьему тензорным индексам.

Теперь уравнение сохранения массы при движении сплошной среды может быть записано в виде

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \text{div}(X) = 0 \quad (5)$$

или, что эквивалентно

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + L_{\mathbf{X}} \right) (\rho \Omega_g) = 0.$$

Обозначим действие метрического изоморфизма $g : TM(M) \leftrightarrow TM^*(M)$ на векторные поля и дифференциальные формы как $X^\ell = g(\mathbf{X})$. Согласно второму закону Ньютона произведение массы на ускорение элемента среды $\rho \frac{d\mathbf{X}}{dt}$ должно равняться силе, которая складывается из действия натяжения $\text{div}^\ell(\sigma)$ и внешней силы Лоренца $qE^\ell + *[j, B]^\ell$, где q – плотность заряда, а j – дифференциальная 2-форма плотности тока, а квадратные скобки обозначают коммутатор. В результате, получается уравнение

$$\rho \frac{d\mathbf{X}}{dt} = \text{div}^\ell(\sigma) + qE^\ell + *[j, B]^\ell. \quad (6)$$

Данное уравнение можно преобразовать к виду

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \mathbf{X}^\ell - \operatorname{div}(\rho \mathbf{X} \otimes \mathbf{X} + \sigma) + q \mathbf{E}^\ell + *[\mathbf{j}, \mathbf{B}]^\ell,$$

который выражает сохранение механического импульса $\rho \mathbf{X}^\ell$.

Наконец, сохранение энергии в нашей системе описывается уравнением

$$\frac{d\varepsilon}{dt} + \varepsilon \operatorname{div}(X) + \operatorname{div}(\mathbf{J}_q + \mathbf{S}^\ell) = \sigma \cdot \Delta + *(j \wedge E), \quad (7)$$

где $\mathbf{J}_q = \kappa \nabla \theta$ – поток тепла (κ – коэффициент теплопроводности), а \mathbf{S}^ℓ – вектор Пойнтинга $\mathbf{S} = *(E \wedge *B)$. Уравнение (7) выражает тот факт, что внутренняя энергия переносится в нашей системе посредством потока тепла и электромагнитного излучения и рассеивается в тепло за счет омического нагрева и работы вязких сил. Наконец, уравнения (5-7) совместно с материальными соотношениями (2-4) и законом сохранения заряда образуют систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div}(X) = 0 \\ \frac{\partial q}{\partial t} + *dj = 0 \\ \rho \frac{dX}{dt} = \operatorname{div}^\ell(\sigma) + qE + *[\mathbf{j}, \mathbf{B}] \\ \frac{d\varepsilon}{dt} + \varepsilon \operatorname{div}(X) + \operatorname{div}(\mathbf{J}_q + \bar{\mathbf{S}}^\ell) = \sigma \cdot \Delta + *(E \wedge j) \end{array} \right.$$

которую необходимо дополнить уравнениями Максвелла

$$\left\{ \begin{array}{l} dD = q \\ dB = 0 \\ dE = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ dH = j + \frac{\partial D}{\partial t} \end{array} \right.$$

и законом Ома $*E^\ell + [*X^\ell, B] = j/\eta$ для образования полной системы уравнений.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда BASIS Foundation с номером гранта 19-7-1-13-5.

Библиографический список

1. Миямото, К. Основы физики плазмы и управляемого синтеза / К. Миямото – М.: Физматлит, 2007. – 67 с.
2. Гавриков, М.Б. Двухжидкостная электромагнитная гидродинамика / М.Б. Гавриков. – М.: КРАСАНД, 2018. – 5 с.

3. Duyunova, A. Continuum mechanics of media with inner structures / A. Duyunova, V. Lychagin, S. Tychkov // *Differential Geometry and its Applications*. – 2021. Vol. 74. – P. 101703 (1–10).
4. Procesi C. *Lie Groups: An Approach Through Invariants and Representations* / C. Procesi. – Springer, 2005.

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ БПЛА В ЗАДАЧЕ ПОКРАСКИ НАРУЖНЫХ СТЕН ЗДАНИЙ

А.А. Саломатин

Разработан алгоритм выбора оптимальной группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и последовательности их действий, необходимый для решения задачи покраски наружных стен зданий в общем случае. Приведены примеры используемых БПЛА двух типов – БПЛА-наблюдатель и БПЛА-маляр, а также способа нанесения краски – с помощью пневматического краскопульта. Отмечены ситуации, возникающие в ходе выполнения задачи, при которых БПЛА принимает решение о дальнейших действиях, на основе проверки заданных математических условий.

Ключевые слова: БПЛА, групповое управление, покрасочные работы, оптимизация.

В наше время активно развивается область, связанная с автоматизацией различных рабочих процессов за счет внедрения роботов. Многие выполняемые задачи становятся не только более глобальными и сложными, но и опасными, поэтому на смену людскому труду приходит слаженная, тщательно спланированная работа групп роботов.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) заслуживают отдельного внимания исследователей. Их сфера применения более обширная по сравнению с наземными работами, что позволяет им выполнять комплексные задачи, где сформированная гетерогенная группа может обеспечить оптимальный результат на всех стадиях поставленной им работы. Это означает, что БПЛА позволяют справиться с задачей качественнее и быстрее, также обеспечивая большую безопасность за счет того, что нет рисков возникновения опасности для человека.

Сегодня популярны и востребованы покрасочные работы. С одной стороны, идет активное строительство новых зданий, их число растет, и малярные работы являются важным этапом, совершаемым перед сдачей объектов в эксплуатацию [1]. С другой стороны, покрасочные работы могут применяться при реставрации зданий или при обновлении, когда необходимо облагородить внешний вид здания и продлить сроки его службы. Во всех отмеченных случаях работы, связанные с покраской возможно осуществлять как внутри помещений в зданиях, так и снаружи. Однако, если планируются применять БПЛА, то эффективное их использование полностью раскрывается в случае покраски наружных стен, где может проводиться покрасочная работа на большой высоте, сами

размеры зоны выполнения покрасочных работ могут быть крупные и возможно отсутствие жесткого разбиения зоны на отдельные независимые участки [2]. Система управления группой БПЛА, занимающихся покрасочными работами, должна обеспечивать устойчивое функционирование группы при решении комплексной задачи с обеспечением максимальной эффективности.

Несмотря на наличие большого количества математических методов и алгоритмов, описывающих групповое управление БПЛА при решении задач, среди них не существует универсального, позволяющего выявить оптимальное выполнение миссии на каждой стадии [3]. Таким образом, остается открытым вопрос формирования группы БПЛА и последовательности их действий для эффективного выполнения задачи, в данном случае, для покраски наружных стен зданий.

Рассмотрим решение задачи для стандартного случая, с которым можно часто столкнуться на практике. Пусть имеется здание в форме параллелепипеда с размерами $a \times b \times c$ метров, и необходимо осуществить полную покраску наружных стен здания одним цветом в нужных местах с целью реставрации с наибольшей эффективностью.

Для осуществления этой цели в наличии имеется краска в банках, N_{1c} БПЛА-наблюдателей, N_{2c} БПЛА-маляров, которые изначально расположены недалеко на складе на расстоянии d метров от здания. БПЛА-наблюдатели используются для облета здания и поиска зон для покраски, БПЛА-маляры используются для осуществления покрасочных работ и транспортировки грузов, представленных банками краски и средством для нанесения краски, представленным пневматическим краскопультотом. И пусть A_1 – множество ТТХ БПЛА-наблюдателя, A_2 – множество ТТХ БПЛА-маляра. ТТХ БПЛА-наблюдателей и ТТХ БПЛА-маляров представлены в табл. 1 и табл. 2 соответственно, они взяты в качестве примерных и на практике могут незначительно различаться.

Таблица 1

ТТХ БПЛА-наблюдателя

Максимальная высота полета	Устойчивость к максимальной скорости ветра	Максимальная скорость набора высоты	Максимальная скорость снижения	Максимальная скорость
5000 м	10 м/с	6 м/с	4 м/с	до 80 км/ч

Таблица 2

ТТХ БПЛА-маляра

Максимальная высота полета	Устойчивость к максимальной скорости ветра	Максимальная скорость набора высоты	Максимальная скорость снижения	Максимальная скорость
3000 м	10 м/с	8 м/с	4 м/с	до 60 км/ч

В качестве показателя эффективности будем рассматривать суперкритерий S , выраженный общим числом задействованной техники N и временем выполнения работы T [4]. Качество покрасочных работ, выраженное в процентах, считается равным 100. Это соответствует тому, что все здание было обследовано и все места были покрашены. Допустим, что зоны для покраски не могут быть большие, и поэтому объема краски в заряженных краскопультах достаточно для покраски зон. Также, учитывая ТТХ БПЛА и средние размеры здания можно предположить, что в рамках времени, затраченного на общее выполнение миссии, им хватает заряда батареи.

Схематично задача в начальный момент времени отражена на рис. 1.

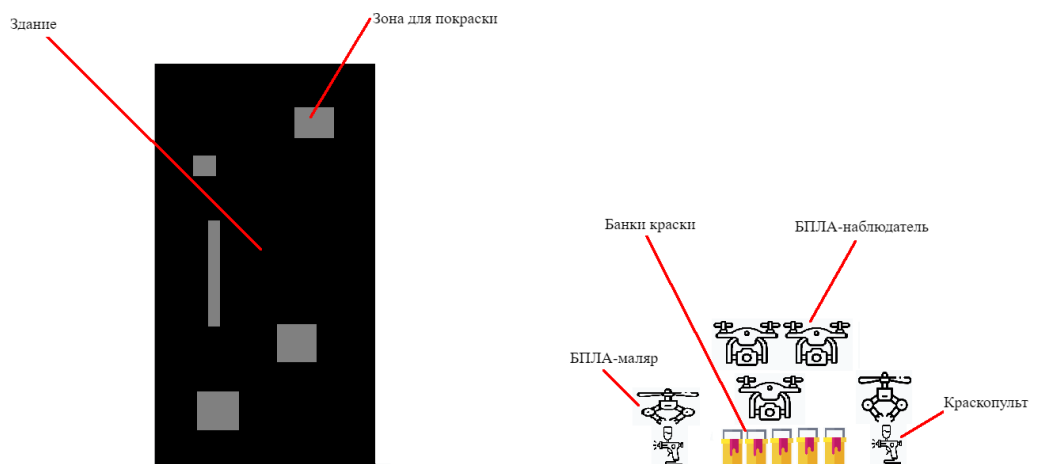


Рис. 1. Схематичное представление задачи в начальный момент времени

Выстраивается следующая математическая постановка задачи оптимальной покраски наружных стен зданий с помощью группы БПЛА:

$$S = f(T(N_1, N_2), N(N_1, N_2)) \rightarrow \min_{N_1, N_2},$$

$$N_1 \leq N_{1c},$$

$$N_2 \leq N_{2c},$$

(1)

$$g(N_1, N_2) \leq P(a, b, c, N_{1c}, N_{2c}, A_1, A_2),$$

где последнее ограничение выражает известные желаемые предпочтения лица, принимающего решение (ЛПР) и учитывает исходные множества остальных входных данных, образованных $a, b, c, N_{1c}, N_{2c}, A_1, A_2$, f – функция от значений критериев времени и числа задействованных БПЛА, а функции T и N также подвергаются минимизации. Вид функции g определяет ЛПР (аддитивный или мультипликативный), однако остается еще нерешенным вопрос определения зависимости $T(N_1, N_2)$; для другой функции, очевидно, что

$$N(N_1, N_2) = N_1 + N_2. \quad (2)$$

Для поиска зависимости $T(N_1, N_2)$ исследуем, как должен происходить полет БПЛА-наблюдателей и БПЛА-маляров с учетом заданных исходных данных. Выполнение миссии осуществляется параллельно как БПЛА-наблюдателем, так и БПЛА-маляром. В начале выбирается некоторое число БПЛА-наблюдателей, которые должны осуществить обследование здания. Для обследования БПЛА исследуют стены зданий во всех его 4 гранях, облетая сверху вниз, меняя сторону здания снизу при возможности, и возвращаясь на склад по изначальной высоте полета. Если БПЛА несколько, то зоны обследования разбиваются равномерно, меняются сами границы высот обследований для каждого из БПЛА, однако высота полета для возвращения не изменяется (рис. 2).

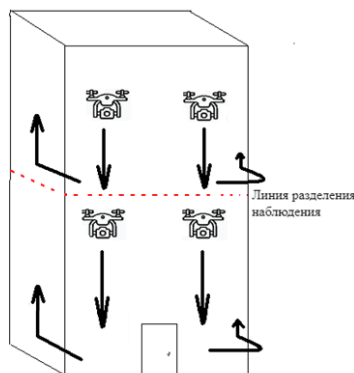


Рис. 2. Пример обследования здания с равномерным разбиением и направлениями движения для БПЛА-наблюдателей

В случае обнаружения зоны для покраски к зданию отправляется БПЛА-маляр, имеющий с собой заряженный краскопульт, а также БПЛА-наблюдатель для контроля покраски. БПЛА-маляр приближается к нижней части зоны покраски и начинает, раскрашивать зону в нужный цвет, активируя краскопульт. В это время БПЛА-наблюдатель контролирует процесс. В зависимости от наличия краски у БПЛА принимается решение о возвращении на базу его и соответствующего БПЛА-наблюдателя, либо дальнейшем их участии в покрасочной работе. Считаем, что у участвующих БПЛА не должно быть простоев.

Рассмотрим подробнее, как осуществляется принятие решения. Пусть в краскопульте осталось V^* литров (для перевода в кубометры умножить на 1000) краски, и есть зона размерами $l_1 \times l_2$ метров, нуждающаяся в покраске. Тогда площадь зоны покраски равна $l_1 * l_2$ м². Допустим, что на поверхность при распылении переносится 70 % краски. Тогда, будем считать, что БПЛА-маляр сможет покрасить зону для покраски в случае, если выполняется соотношение $\frac{70 * V^* * 1000}{100} \geq l_1 l_2$. Возможен промежуточный случай в ходе выполнения миссии, когда исследуемая

зона для покраски будет большой и для ее покраски качественной необходимо будет участие не одного, а нескольких роботов. Если в среде функционирует группа из M БПЛА-маляров, способная обрабатывать некоторую площадь S_a , причем каждый дрон может обрабатывать площадь $1000V^*$, то для покраски нужно как минимум $\lceil \frac{S_a}{1000V^*} \rceil$ БПЛА-маляров. Итого, получим следующую зависимость, которую в дальнейшем можно будет использовать в (1) для решения:

$$T(N_1, N_2) = \max \left(t_{\text{обсл}}(N_1), t_{\text{полет}}(N_2), t_{\text{посл.обнаруж.}} + t_{\text{покраски}}(N_2) \right). \quad (3)$$

При этом в (3) $t_{\text{обсл}}(N_1)$ – время, необходимое на обследование всего здания с помощью N_1 БПЛА-наблюдателя и полет от склада до здания, $t_{\text{полет}}(N_2)$ – время, необходимое на полет БПЛА-маляра от склада до здания, $t_{\text{посл.обнаруж.}}$ – время последнего обнаружения зоны для покраски (изначально оно неизвестно, однако можно задать в качестве предполагаемого), $t_{\text{покраски}}(N_2)$ – время, покраски этой зоны с учетом числа задействованных БПЛА-маляров.

Заключение. Итак, в результате проведенного исследования был описан алгоритм выбора и действий группы БПЛА-наблюдателей и БПЛА-маляров, который позволяет добиться эффективного результата выполнения задачи покраски наружных стен здания. Алгоритм представлен несколькими этапами. Прежде всего, происходит сбор исходных входных данных, которые не меняются в ходе решения задачи. После этого, ЛПР задает свои предпочтения в плане учета важности общего времени выполнения миссии по сравнению с количеством задействованной техники, тем самым определяет зависимость эффективности выполнения миссии от сформированной группы БПЛА. Далее, в ходе выполнения миссии решается многокритериальная задача оптимизации, которая позволяет сформировать оптимальную группу БПЛА. Более того, ЛПР также задает свои предпочтения в плане выполнения поставленной задачи с помощью БПЛА в конкретный момент времени. Данные предпочтения определяют последовательность задаваемых действий для БПЛА и представлены в математической постановке многокритериальной задачи с помощью отдельного ограничения, выраженного неравенством.

Библиографический список

1. Коржова, С.Л. Покрасочные работы в строительстве / С.Л. Коржова // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогасоснабжения и энергообеспечения. – 2019. – С. 156–158.
2. Аксенов, А.А. Организация и проведение покрасочных работ / А.А. Аксенов. – М.: Альтаир: МГАВТ, 2013. – 102 с.

3. Кокуев, А.Г. Система управления группой покрасочных роботов с алгоритмом динамического распределения объема работ / А.Г. Кокуев, Е.Ф. Райкова, О.В. Антонов, А.В. Сычев // Современные научные исследования и инновации. – 2022. – № 4. – С. 1–5.

4. Каляев, И.А. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян. – М.: Физматлит, 2009. – 280 с.

5. Аксенов, А.А. Организация и проведение покрасочных работ. – М.: Алтайр: МГАВТ, 2013. – 102 с.

6. Кокуев, А.Г., Райкова, Е.Ф., Антонов, О.В., Сычев, А.В. Система управления группой покрасочных роботов с алгоритмом динамического распределения объема работ // Современные научные исследования и инновации. – 2022. – №4. – С. 1–5.

7. Каляев, И.А., Гайдук, А.Р., Капустян, С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ РАЗГРУЗКИ СУДОВ НА ПРИЧАЛАХ УГОЛЬНОГО ТЕРМИНАЛА ДЛЯ МОРСКИХ ПОРТОВ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ

М.Л. Сомов, Е.Б. Барашов, Д.В. Лемтюжникова

В данной работе рассматривается задача разгрузки судов, прибывающих в морской порт. При этом учитываются ограничения, связанные с работой причалов: количество доступных для работы кранов, которые привязаны к нескольким причалам одновременно, скорость разгрузки каждого из них и объем груза на кораблях. Предлагается решение данной задачи с целевой функцией максимизации суммарных приоритетов обслуженных кораблей по всем операциям. Используются псевдо-реальные данные на основе оперативных показателей 2022 года и отчетных документов для морских портов Дальнего Востока России.

Ключевые слова: железнодорожное планирование, дискретная оптимизация, порт Восточный (Находка), оптимизация разгрузки портов.

В данной работе рассмотрена задача разгрузки прибывающих кораблей с разным приоритетом. В качестве целевой функции выбрана максимизация суммарного приоритета обслуженных кораблей. Задачу можно сформулировать следующим образом. Изначально есть угольный порт, а также его причалы с кранами, которые производят разгрузку. Имеется горизонт планирования, в течение которого требуется для поступающих кораблей определить причал для разгрузки с учетом ограничений на мобильность крайних кранов.

Ниже приводится краткий обзор изучаемой проблемы за последние годы. Наиболее популярными алгоритмами для решения задач типа "Морской порт" являются метаэвристические алгоритмы. Среди них наибольшее распространение получил генетический алгоритм и его модификации. В работе [1] рассматривается задача планирования контейнерных интермодальных перевозок «Морской порт – железная дорога». Модель основана на учете гибкого спроса в соответствии с требованиями судов по объему, времени прибытия и отправления. В модели используются три целевые функции: максимизация прибыли перевозчиков, минимизация общих транспортных расходов грузоотправителей и минимизация времени стыковки контейнерных поездов и судов. Эксперименты проводились на данных Китайской железнодорожной компании по контейнерным перевозкам.

Для оптимизации транспортных потоков в портовой транспортной системе используются различные подходы, модели и алгоритмы. Рассмотрим некоторые примеры. В работах [2] и [3] представлен обзор задач, возникающих на территории морского порта, который является связующим звеном между железнодорожным и морским транспортом. В [2] исследуются проблемы оптимизации, возникающие в процессе железнодорожного сообщения в районе порта. Рассматриваются проблемы оптимизации на различных уровнях принятия решений. В статье [3] представлен обзор работ, посвященных исследованию моделей стохастических задач оптимизации. Проводятся эксперименты для изучения влияния переменных модели на общую стоимость и оптимальные маршруты для каждого спроса. В работе [4] исследуется проблема транспортировки груза с фиксированной стоимостью. Используется схема контейнерных перевозок с использованием водного транспорта. Эта модель также учитывает экологичность транспорта. Для решения задачи используется гибридный алгоритм на основе генетического алгоритма. Данные для эксперимента были получены с сайта Центра обслуживания клиентов Китайской железной дороги.

В работе [5] рассматривается проблема оптимизации мультимодальных контейнерных перевозок по морю и железной дороге. В модели используются две целевые функции. Первая целевая функция соответствует минимизации средней стоимости перевозки одного контейнера. Вторая объективная функция минимизирует среднее время прибытия контейнера в порт. Для решения задачи используется генетический алгоритм. В качестве данных используются данные, полученные с учетом разработок и данных Китайской железнодорожной корпорации.

В работе [6] представлено решение нескольких транспортных задач в системе «железная дорога – морской порт». Разработана геометрическая евклидова модель дорожного полигона. Рассмотрены области применения имитационного моделирования и метода мультиагентной оптимизации муравьиной колонии для данной модели. Эксперименты проводились на реальных отраслевых данных. Это позволило провести комплексную оценку текущей ситуации с внутренним распределением импортных/экспортных контейнеров через сеть региональных центров погрузки контейнеров. Многие авторы разрабатывают собственные алгоритмы, учитывающие детальную специфику задачи. В работе [7] исследуется проблема ценообразования и планирования железнодорожных перевозок на участке сухого порта. На этой площадке определяется оптимальное расписание перевозок и их стоимость для максимизации общей прибыли. В то же время для грузоотправителей определяется график поставок с заводов-изготовителей в сухой порт и из сухого порта

на морской терминал при минимизации общих затрат. Представлены три варианта модели: максимизация прибыли сухого порта, минимизация стоимости перевозки для каждого грузоотправителя и обобщенная двухуровневая модель. Авторы проводят расчеты на тестовых данных с использованием собственного алгоритма для двухуровневой модели. Исследовано влияние ключевых параметров модели на показатели работы сухого порта и отдельных грузоотправителей. В работе [8] представлена интегрированная сеть морских и железнодорожных перевозок вдоль арктического маршрута. Имеется только один маршрут, связанный с несколькими портами, и суда перевозят контейнеры между несколькими портами по этому маршруту. Все данные были получены из Лаборатории логистики портов и судоходства Даляньского морского университета. Решение задачи осуществлялось с помощью алгоритма Бендерса. Результаты показывают, что количество центральных узлов оказывает большое влияние на общую стоимость перевозки и расположение узлов.

Математическая модель генерация данных. В данной работе рассматривается задача оптимизации разгрузки кораблей в угольном терминале с несколькими причалами с учетом приоритета корабля. Дано множество заявок на разгрузку кораблей и терминал с множеством причалов. На каждом причале находятся грузовые краны, которые занимаются разгрузкой кораблей. В качестве источника данных для этой модели использовался официальный сайт находкинского порта (<http://www.nmtpport.ru/terminaly/>). Исследовалась работа угольного терминала: у него на обслуживании состоят 26 подъемных кранов типа Витязь (<https://www.nevainter.com/files/File/2019/programm/material/1809/smm.pdf?ysclid=l5z86gw0r0969575207>). Сам терминал состоит из 8 причалов, каждый из которых обслуживается пятью кранами. Краны расположены на рельсах и могут перемещаться между портами. Данный терминал принимает грузовые корабли с определенными характеристиками. Исследование показало, что под это описание подходят сухогрузы типа СУХОГРУЗНОЕ СУДНО, ПРОЕКТ RSD59 7535 т, САМОХОДНОЕ СУХОГРУЗНОЕ СУДНО, ПРОЕКТ RSD49 7154т. Согласно технической документации, они могут перевозить до 8000 тонн. Генерация данных основана на исследованной документации из открытых источников и задается следующим образом. У каждого корабля есть приоритет на разгрузку 1, 2 или 3. Приоритеты кораблей генерируются равномерным распределением. В среднем получается треть кораблей с приоритетом 3, треть с приоритетом 2, и треть с приоритетом 1. Объем груза на корабле также генерируется равномерным распределением от 5000 до 8000 тонн. Еще есть скорость разгрузки тонн/час для кранов. В данном порту имеются две модели кранов: со скоростью разгрузки 1100 тонн/час и 1600 тонн/час.

Было принято решение взять половину кранов первой модели, половину кранов второй модели, которые чередуются на рельсах. Горизонт планирования равен недели. За неделю в среднем порт может разгрузить 900-950 кораблей с таким количеством тонн груза. Изначально в заявку передается 1000 кораблей для обслуживания на следующую неделю, то есть чуть больше 50 кораблей в среднем не будут обслужены. Теперь перейдем к формализации задачи. Введем обозначения переменных, используемых в задаче: I – количество кранов, J – количество кораблей, K – количество причалов. В качестве параметров и переменных используется: v_i – скорость разгрузки тонн/час i -ым краном, $i \in I$, p_j – приоритет корабля j на разгрузку, $j \in J$, c_i – объем груза на i -ом корабле, $y_{ij} = T$, если кран i разгружает T тонн с корабля j , $j \in J$, $z_{ij} = 1$, если кран i разгружает ненулевое количество тонн с корабля j , $x_{jk} = 1$, если корабль j разгружается на k -ом причале, $k \in K$.

Целевая функция в данной постановке принимает следующий вид:

$$\sum_j \sum_k x_{jk} p_j \rightarrow \max.$$

Перечислим ряд ограничений, необходимых для данной постановки:

$$\begin{aligned} \frac{y_{ij}}{8000} &\leq z_{ij} \leq y_{ij}, \\ \sum_k x_{jk} &\leq 1, \forall j \in J, \\ \sum_i y_{ij} &= \sum_k c_j x_{jk}, \forall j \in J, \\ \sum_j \frac{y_{ij}}{v_i} &\leq W, \forall i \in I, \\ z_{ij} &\leq x_{j1}, i \in \{1, 2, 3\}, \forall j \in J, \\ z_{ij} &\leq x_{j8}, i \in \{24, 25, 26\}, \forall j \in J, \\ z_{(3 \cdot k)j} &\leq x_{jk}, k \in \{2, \dots, 7\}, \forall j \in J, \\ z_{ij} &\leq x_{jk} + x_{j(k+1)}, i \in \{2k + 1, 2k + 2\}, k \in \{2, \dots, 7\} \forall j \in J. \end{aligned}$$

Целевая функция максимизирует взвешенное с приоритетом количество разгруженных кораблей. Первое ограничение связывает переменные y_{ij} и z_{ij} . Ограничение 2 гарантирует, что каждый корабль будет разгружаться не более чем на одном причале. Третье ограничение гарантирует, что все назначенные корабли на заданный горизонт планирования будут полностью разгружены. Ограничение 4 гарантирует, что краны не будут перерабатывать. Оставшиеся ограничения «привязывают» краны к соответствующим причалам. В данном случае имеется 26 кранов и 8 причалов. Далее в экспериментах будет наглядно показано, как краны распределяются между причалами.

Вычислительные эксперименты. Эксперименты были проведены с помощью решателя Gurobi в среде Python. Для каждого графика и

гистограммы эксперименты проводились с различными генерациями и были взяты результаты в среднем.

На рис. 1 показано, какое количество кораблей было обслужено на причалах. Разброс значений объясняется скорее всего тем, что на восьмом причале большее число обслуженных кораблей имеет меньшую грузоподъемность, чем на остальных причалах, а на причалах 3, 5 и 7 обслуживались корабли с большей грузоподъемностью. Проверим эту гипотезу на других графиках.

На рис. 2 показано количество разгруженных кораблей при общем количестве в 1000 кораблей в зависимости от среднего веса их груза. Разрывы между скоплением точек показывают, как происходит выбор алгоритма при распределении кораблей между причалами при увеличении среднего веса груза кораблей. Для алгоритма преимущественно выбрать меньше кораблей с большим весом.

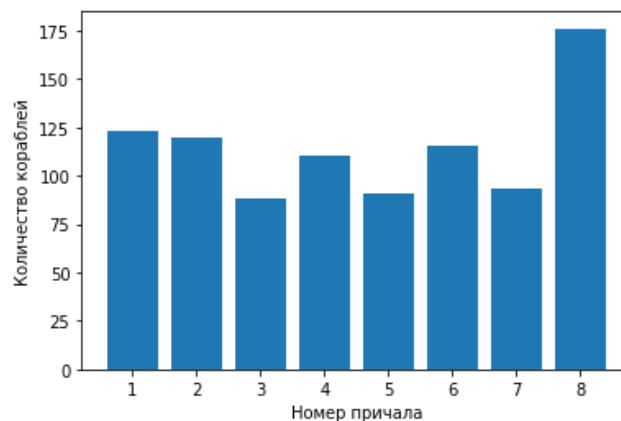


Рис.1. График обслуживания кораблей на причалах

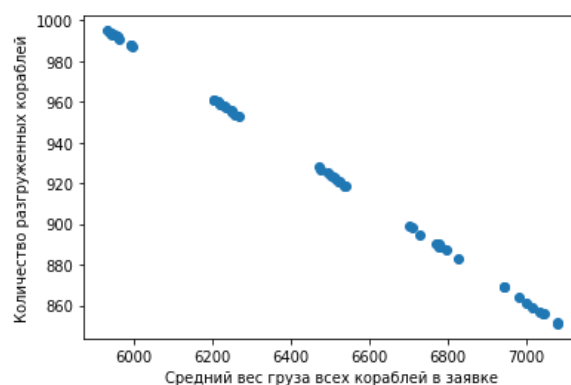


Рис. 2. График количества разгруженных кораблей

На рис. 3 показано соотношение общего количества заявок и заявок, которые были приняты. Для небольших выборок характерна небольшая разность между числом всех заявок и числом принятых заявок. То есть чем

больше заявок появляется, тем больше принимается. Однако, когда получено около тысячи заявок, то с ростом общего числа заявок количество принятых заявок остается примерно одним и тем же с небольшими колебаниями, которые объясняются различием в выборках.

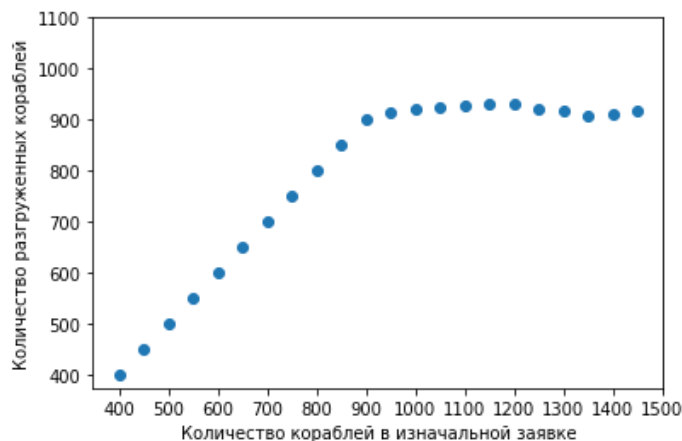


Рис. 3. График соотношения общего количества заявок и принятых заявок

На рис. 4 показано распределение количества разгруженных кораблей в зависимости от генерации. Другими словами, эта гистограмма показывает, как сильно отличается количество разгруженных кораблей от различных генераций. Как видим, разброс совсем небольшой, что показывает устойчивость генераций и решения.

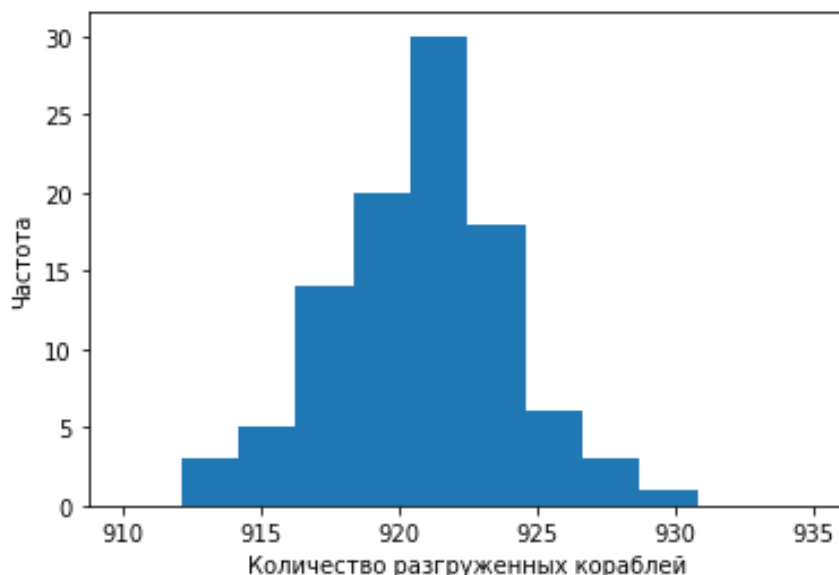


Рис. 4. График распределения количества зарубежных кораблей

В табл. 1 показано распределение разгрузки между кранами. В строках Таблицы указаны номера кранов, а столбцы соответствуют номерам

причалов. Значение ячейки показывает, сколько тысяч тонн груза суммарно разгрузил кран на соответствующем причале. Таблица имеет диагональную структуру, что отражает соответствие крана и группы причалов, которые он обслуживает.

Таблица 1

	Номера причалов								
	1	1	2	3	4	5	6	7	8
Номера кранов	2	268	0	0	0	0	0	0	0
	3	184	0	0	0	0	0	0	0
	4	70	198	0	0	0	0	0	0
	5	66	117	0	0	0	0	0	0
	6	0	268	0	0	0	0	0	0
	7	0	82	102	0	0	0	0	0
	8	0	138	129	0	0	0	0	0
	9	0	0	184	0	0	0	0	0
	10	0	0	84	184	0	0	0	0
	11	0	0	68	116	0	0	0	0
	12	0	0	0	268	0	0	0	0
	13	0	0	0	35	149	0	0	0
	14	0	0	0	64	203	0	0	0
	15	0	0	0	0	184	0	0	0
	16	0	0	0	0	38	230	0	0
	17	0	0	0	0	39	145	0	0
	18	0	0	0	0	0	268	0	0
	19	0	0	0	0	0	26	158	0
	20	0	0	0	0	0	59	208	0
21	0	0	0	0	0	0	184	0	
22	0	0	0	0	0	0	24	244	
23	0	0	0	0	0	0	34	150	
24	0	0	0	0	0	0	0	268	
25	0	0	0	0	0	0	0	184	
26	0	0	0	0	0	0	0	268	

Заключение. В данной работе разработана модель для задачи оптимизации разгрузки судов на примере работы угольного терминала порта Восточный (Находка). Данные для вычислений брались из официальных источников. На основе открытых данных были сгенерирован

выборки с разной плотностью поступления заявок на разгрузку и различным весом груза соответствующих кораблей. Проведен ряд экспериментов с помощью решателя Gurobi. Показано, что какое количество кораблей было обслужено на каждом причале. Также показано количество разгруженных кораблей в зависимости от среднего веса их груза. Показано распределение разгрузки между кранами на каждом причале. В дальнейшем планируется усложнение модели с учетом риском задержки кораблей, а также разработка модели с учетом погрузочно-разгрузочных работ с учетом использования портовых складов.

Библиографический список

1. Zhang, Q. Multi-objective Model on Connection Time Optimization in Sea-rail Intermodal Transport / Q. Zhang, H. Yang, L. Zhang // *GSTF Journal of Engineering Technology (JET)*. – 2014. – Vol. 3, No. 1.
2. Zhao, Y. A chance-constrained stochastic approach to intermodal container routing problems / Y. Zhao, R. Liu, X. Zhang, A. Whiteing // *PloS one*. – 2018. – Vol. 13, No. 2. – P. e0192275.
3. Ambrosino, D. Optimization challenges and literature overview in the intermodal rail-sea terminal / D. Ambrosino, V. Asta, T.G. Crainic // *Transportation Research Procedia*. – 2021. – Vol. 52. – P. 163–170.
4. Zhao, J. Study on scheme of outbound railway container organization in rail-water intermodal transportation / J. Zhao, X. Zhu, L. Wang // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12, No. 4. – P. 1519.
5. Hu, G. Optimization of train operation scheme for container sea-rail multimodal transport / G. Hu, W. Sun, J. Jiang // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1802, No 3. – P. 032068.
6. Chislov, O. Methodological bases of modeling and optimization of transport processes in the interaction of railways and maritime transport / O. Chislov, V. Zadorozhnyi, D. Lomash, E. Chebotareva, I. Solop, T. Bogachev // *Scientific And Technical Conference Transport Systems Theory And Practice*. – Springer, Cham, 2019. – P. 79–89.
7. Qiu, X. Optimizing rail transport service in a dry port system / X. Qiu, G. Xu // *IEEE Transactions on Engineering Management*. – 2019.
8. Han, P. A New Model for Sea-Rail Intermodal Transportation Network System Planning Considering the Arctic Route / P. Han, Z. Sun, K. Liu, B. Li // *2021 4th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS)*. – IEEE, 2021. – P. 351–356.

ОПТИМИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ПОТОКОВ ДАННЫХ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Д.В. Топольский, Н.Д. Топольский

В работе рассмотрены предложения по оптимизации управления элементами интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивной сетью. Рассмотрена структура интеллектуальных систем учета электроэнергии. Приведены данные моделирования работы цифровых трансформаторов, подключенных к системе учета электроэнергии с помощью интеллектуального модуля сопряжения. Исследовано влияние информационного шторма на задержки передачи данных между умными устройствами в информационно-управляющей сети. Установлено, что наблюдаемая нагрузка не нарушает работу умных устройств и информационно-управляющей сети. Проведен ряд исследовательских испытаний модуля сопряжения для проверки соответствию требованиям стандарта МЭК 61850 выходного потока данных для систем управления интеллектуальных систем учета электроэнергии.

Ключевые слова: система учета электроэнергии, цифровой измерительный трансформатор, потоки данных, интеллектуальные устройства, МЭК 61850.

Примером развития больших систем в энергетике является появление интеллектуальных электроэнергетических систем с активно-адаптивной сетью. Электроэнергетическая система рассматривается как топологическая сеть, состоящая из линий электропередачи и подстанций, обеспечивающих связь узлов генерации с узлами потребления. Одной из особенностей электроэнергетических систем с активно-адаптивной сетью является то, что они позволяют потребителям как покупать электроэнергию из сети, так и продавать ее излишки, используя собственную генерацию.

Цифровые подстанции являются узлами активно-адаптивной сети, объединяющими различное оборудование, обеспечивающее управление передачей электроэнергии в соответствии с заданным режимом работы энергетической системы. Одним из ключевых моментов в работе энергосистем с активно-адаптивной сетью является автоматизированный учет потоков электроэнергии. Развитию систем управления интеллектуальных систем учета электроэнергии уделяется особое внимание [1, 2].

Программно-аппаратные комплексы цифровых подстанций содержат большое количество интеллектуальных электронных устройств. Каждое из этих устройств наделено функциями управления системой учета электроэнергии. Наличие в составе системы управления устройств, обладающих слабым искусственным интеллектом, дает широкие возможности для организации управления большими системами [3].

Организация управления интеллектуальными системами учета электроэнергии связана с обработкой больших потоков данных. Это влечет за собой совершенствование программно-аппаратного обеспечения измерений и передачи данных учета электроэнергии [4, 5]. В области развития цифровых систем управления интеллектуальным учетом электроэнергии отдельным направлением является применение цифровых измерительных трансформаторов. Они призваны увеличить производительность труда и уменьшить занимаемую площадь, а также повысить уровень безопасности обслуживающего персонала. Для управления работой цифровых измерительных трансформаторов применяются высокопроизводительные вычислительные устройства [6].

Оптимизация системы управления возможна за счет повышения уровня искусственного интеллекта модулей сопряжения. Такие модули сопряжения зачастую имеют избыточную производительность. Есть возможность использовать эту вычислительную мощность для анализа потока измерительных данных и, при необходимости, выдавать сигналы об аварийной ситуации. Для этого необходимо оптимизировать технологию обмена информацией между измерительным трансформатором и системой учета электроэнергии [7].

Предлагается в качестве критерия оптимизации обработки потока данных исследовать реакцию системы управления учета электроэнергии на аварийные сигналы.

Структурная схема измерительной части системы учета электроэнергии на основе цифровых измерительных трансформаторов представлена на рис. 1. Интеграция измерительных трансформаторов в сеть осуществлена на основе использования модуля сопряжения Авача (рис. 2). Модуль сопряжения Авача позволяет принимать данные от трех цифровых измерительных трансформаторов и формировать пакеты МЭК 61850.

Сформированный модулем сопряжения Авача пакет МЭК 61850 транслируется на следующий (верхний) уровень системы управления для анализа и контроля над поведением системы учета электроэнергии. Однако, благодаря высокой производительности модуля, можно проанализировать данные сразу на низком уровне. Тогда при обнаружении аварийной ситуации модуль может выдать сигнал аварийного отключения оборудования, минуя верхний уровень системы управления и, тем самым, сократить время реакции на внештатную ситуацию. При наделении модуля

сопряжения Авача функциями анализа данных становится возможным ускорение принятия решений об отработке аварийных сигналов и оптимизация обработки потоков данных в интеллектуальных системах учета электроэнергии.

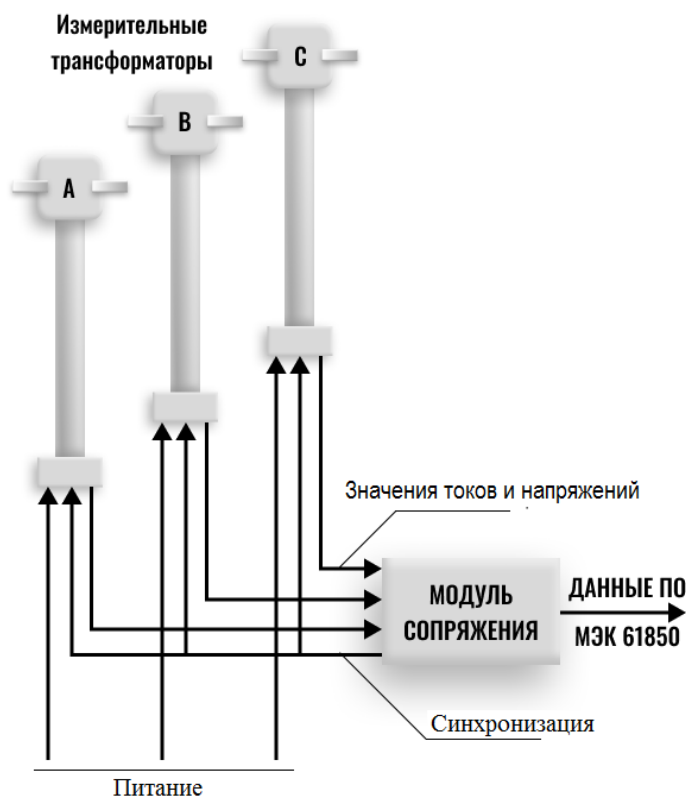


Рис. 1. Измерительная часть системы учета электроэнергии: А, В, С – цифровые трансформаторы для измерения фазных токов и напряжений в фазах А, В, С соответственно



Рис. 2. Модуль сопряжения Авача

Для проверки возможности оптимизации программно-аппаратного обеспечения модуля Авача была смоделирована топология информационно-управляющей сети от цифрового измерительного

трансформатора до SCADA-системы. В программной среде Riverbed Modeler был разработан цифровой двойник сети данной топологии (рис. 3).

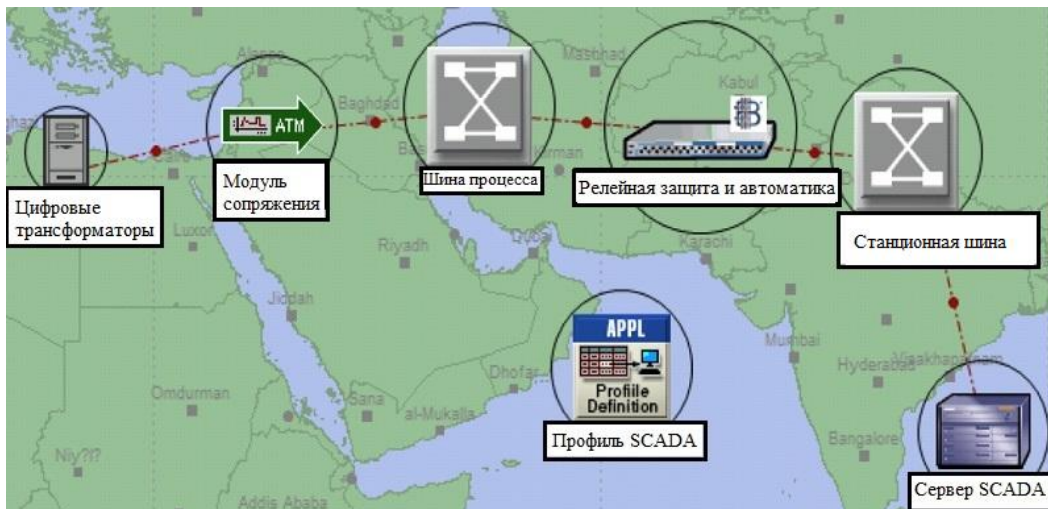


Рис. 3. Цифровой двойник информационно-управляющей сети в среде Riverbed Modeler

Исходными данными для моделирования являлись значения задержек времени, регламентированные стандартом МЭК 61850. Для нормальной работы энергообъекта значения задержки времени получения информации от источника и реакции на него не должны превышать 400 мс. В ходе исследования был смоделирован информационный шторм. Он соответствует либо большому количеству аварийных ситуаций, либо кибератаке на энергетический объект. Информационный шторм был смоделирован скачкообразным изменением нагрузки на информационно-управляющую сеть энергообъекта. Моделирование показало, что величина задержек времени соответствует значениям, допускаемых стандартом (рис. 4).

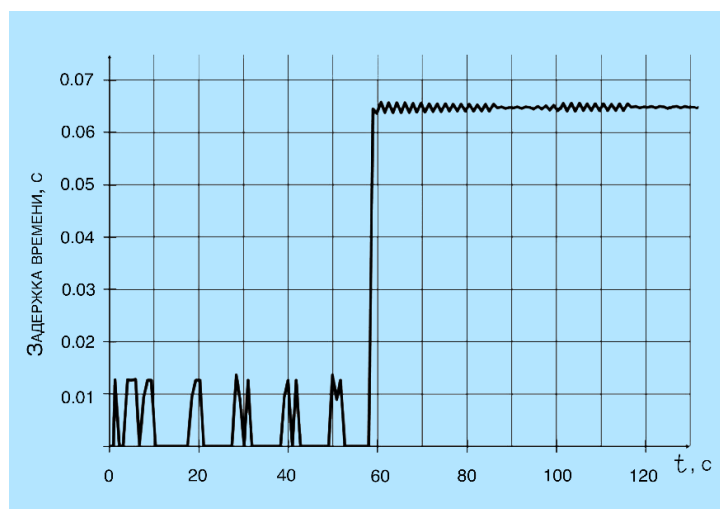


Рис. 4. Результаты реакции интеллектуальной системы учета электроэнергии на информационный шторм

Также был произведен ряд исследовательских испытаний модуля сопряжения. Одним из исследований являлась проверка потока выходных данных модуля сопряжения на соответствие стандарту МЭК 61850. Проверка показала, что потоки выходных данных полностью соответствуют требованиям стандарта (рис. 5).



Рис. 5. Проверка потоков данных на соответствие стандарту МЭК 61850

Кроме того, была разработана программа опытной эксплуатации трансформатора. В соответствии с ней была осуществлена опытная эксплуатация измерительного цифрового трансформатора. В ходе опытной эксплуатации была организована передача измерительной информации в облачное хранилище в реальном времени (рис. 6), а также производился контроль изоляции и температуры нагрева рабочих частей устройства. Цифровой измерительный трансформатор успешно прошел опытную эксплуатацию в полном соответствии с разработанной программой (рис. 7).

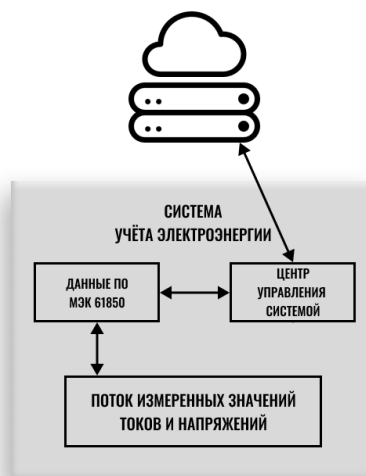


Рис. 6. Схема передачи измерительной информации в облачное хранилище

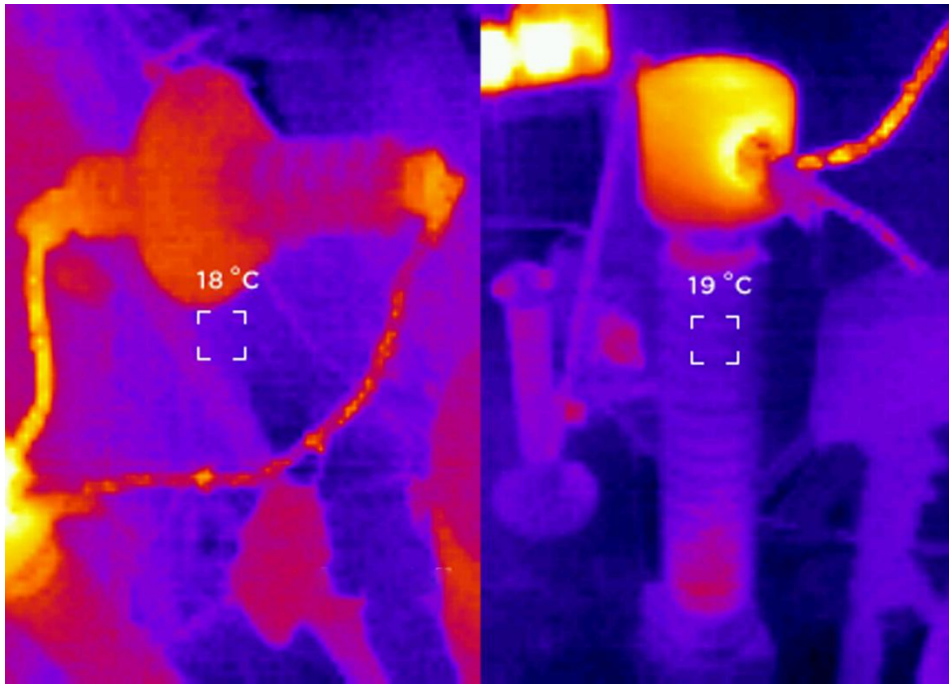


Рис. 7. Опытная эксплуатация измерительного трансформатора с контролем изоляции и температуры нагрева рабочих частей

Заключение. В статье представлены предложения по оптимизации функционала оборудования для интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивной сетью. Оптимизация заключается в повышении уровня слабого искусственного интеллекта умных устройств системы учета электроэнергии. Доказано, что существует возможность повышения производительности и уровня безопасности энергетических систем за счет интеллектуальной обработки данных непосредственно в цифровых измерительных трансформаторах. Результатом является сокращение времени реакции на аварийные ситуации. Проведенное исследование позволит сформировать предложения по внесению изменений в стандарты для систем управления интеллектуальными системами учета электроэнергии.

Библиографический список

1. Чичев, С.И. Методология проектирования цифровой подстанции в формате новых технологий / С.И. Чичев, В.Ф. Калинин, Е.И. Глинкин. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 228 с.
2. Воробьев, Е.С. Переход российской электроэнергетики к модели "Цифрового" развития - технологические и инвестиционные аспекты / Е.С. Воробьев // HUMAN PROGRESS. – 2018. – Т.4, №5. – 2 с.
3. Грабчак, Е.П. Как сделать цифровизацию успешной / Грабчак Е.П., Медведева Е.А., Васильевна И.Г. // Энергетическая политика. – 2018. – №5. – С. 25–29.

4. Горбатенко, Н.А. Цифровизация электроэнергетики России / Н.А. Горбатенко // Вестник науки и образования. – 2020. – № 6-2(84). – С. 5–8.

5. Гаффаров, Р.Ф. Текущее состояние цифровизации в электроэнергетике: проблемы и пути их решения / Р.Ф. Гаффаров, С.А. Александров, М.Ю. Харитонов // ЭНЕРГОЭКСПЕРТ. – 2020. – № 1 (73). – С. 12–14.

6. Головщиков, В.О. Цифровая подстанция - основной элемент цифровой электроэнергетической системы / В.О. Головщиков // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2019. – Т.1. – С. 224–225.

7. Макашева, С.И. Расчет показателей надежности цифровой подстанции / С.И. Макашева, П.С. Пинчуков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2019. – Т.19. – №4. – С. 41–51.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КАНАЛОВ СВЯЗИ ПОДВОДНОЙ РТС И ОПЕРАТОРА

Г.К. Тевяшов

В настоящее время с развитием робототехники и возрастающим интересам к глубинам океанам и другим водоемов при выполнении различных задач с использованием подводных роботов и при условии надежной и оперативной связи с аппаратом, производительность работ значительно возрастает и сокращаются сроки проведения работ под водой. При этом задача связи оператора и подводного робота может решаться различными способами. Некоторые способы уже стали традиционными, а некоторые появились относительно недавно. В данной статье рассматриваются различные каналы связи, а также описывается практический опыт нескольких из них. На основе анализа делается заключение и выбор о наиболее подходящим для будущих исследований способом организации системы: подводный аппарат- оператор.

Ключевые слова: подводный робот, связь под водой, НПА, оператор системы.

Надежное управление любым техническим процессом невозможно без хорошо налаженной связи между всеми участвующими в этом процессе объектами. Особое значение приобретает такая связь при работе с подводными аппаратами. При выполнении подводных задач необходим оперативный и надежный обмен информацией между подводным роботом и оператором, в особенности если ведутся работы по оказанию помощи во время спасательных операций. Требования к оперативности связи возрастают, если при выполнении работ отсутствуют средства видеонаблюдения, например, подводный камера.

Возникающий вопрос разделения функций управления зависит от особенностей системы связи человека и робота, с помощью которой осуществляется взаимодействие между ними. Система связи и информации фактически определяет выбор принципов управления необитаемых подводных аппаратов (НПА). Система связи организовывается таким образом, чтобы обеспечить использование только тех функциональных возможностей оператора, которые имеют явное превосходство перед соответствующими возможностями контроллера самого робота [1].

Контроллер аппарата целесообразно использовать для планирования и выполнения однообразных и утомительных для оператора действий, таких как перенесение предмета, движение в заданном направлении и так далее.

Человек же должен решать более сложные задачи и помогать роботу при поиске выхода из заранее непредвиденных или аварийных ситуаций. С этой целью система связи должна обеспечить человеку доступ к любому уровню управления, включая самые низшие. Существуют и автономные подводные роботы, способные двигаться и принимать решения без вмешательства оператора, но такой вариант требует больших вычислительных и энергоемких ресурсов.

Аппараты, которые передвигаются по земле и/или по воздуху могут передавать видеоданные со своих камер в реальном времени, а иногда и GPS-координаты, и оператор всегда знает, где находится его аппарат, более того, оператор может визуально наблюдать за аппаратом. Другая, разительно отличающаяся, ситуация происходит с подводными аппаратами. Под водой радиоволны крайне сильно ослабевают при прохождении через воду, поэтому фактически реализовать радиосвязь между пультом оператора и подводным роботом невозможно. Кроме того, информация, поступающая на пульт оператора: данные о глубине, курсе, крене и дифференте аппарата, оператор воспринимает только в числовых эквивалентах без визуального наблюдения за аппаратом, что затрудняет оценку его положения в пространстве.

Общая структура системы связи человека с роботом в наиболее полном виде, а также схема взаимодействия этой системы с системой управления подводным роботом представлены на рис. 1.

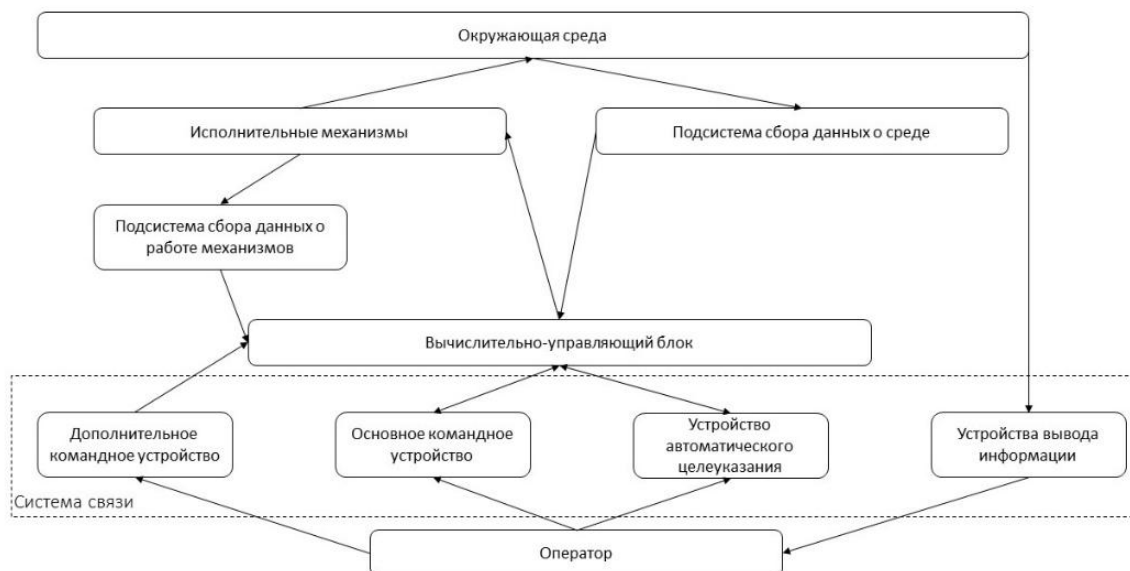


Рис. 1. Система связи человека с подводным роботом

Система связи человека с подводным роботом состоит из четырех основных блоков:

1) основное командное устройство – предназначен для ввода программ управления в вычислительно-управляющий блок;

2) устройство вывода информации – используется для визуального наблюдения за состоянием окружающей среды и исполнительных органов подводного робота. Если робот движущийся, то в этот блок могут быть включены датчики, измеряющие параметры его движения, скорость, пройденный путь, курс, крен, дифферент и т. д.;

3) устройство автоматического целеуказания – позволяет оператору распознавать особенности среды, в которой функционирует подводный робот, выявлять цели и препятствия и вводить их координаты в ЭВМ;

4) дополнительное командное устройство – предназначен для ввода элементарных команд управления роботом, которые оператору удобнее задавать в «коде движений» руки (например, с помощью аналога руки), чем символически (на проблемно-ориентированном языке). Это устройство обычно используется при возникновении аварийных или непредвиденных ситуаций.

Следует отметить, что состав системы связи человека с роботом, объем и сложность аппаратуры, входящей в нее, существенно зависят от назначения и класса задач, для решения которых он предназначен. Так, если роботы используются для исследований в океане, т. е. если задачи, решаемые ими, достаточно сложны, разнообразны и требуется высокая надежность, то целесообразно иметь систему связи в полном объеме, а также специальную приемно-передающую аппаратуру для осуществления связи на больших расстояниях.

Рассмотрим несколько способов организации связи. Условно эти способы можно разделить как на рис.2.

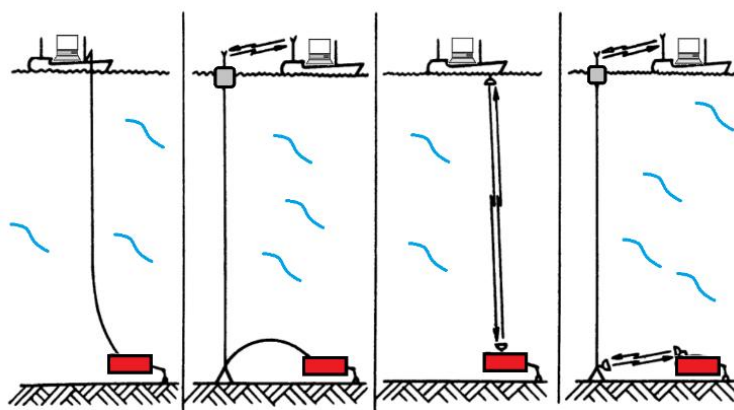


Рис. 2. Различные каналы связи подводных аппаратов и оператора

Малая полоса пропускания гидроакустического канала связи не обеспечивает требуемой скорости информационного обмена [2]. В следствие чего, аппараты малых глубин обычно связаны с

обеспечивающим судном или же поплавковым ретранслятором с помощью кабеля рис. 3. Через кабель подаются и управляющие команды, передается информация, и иногда даже питание. В ряде случаев для разных видов команд предназначены отдельные жилы (линии) кабеля. Однако такое использование канала связи нерационально. Целесообразнее его временное либо частотно-временное уплотнение. Обычно на аппарат передается информация управления, а на обеспечивающее судно – информация о параметрах состояния аппарата, а также видеоинформация.

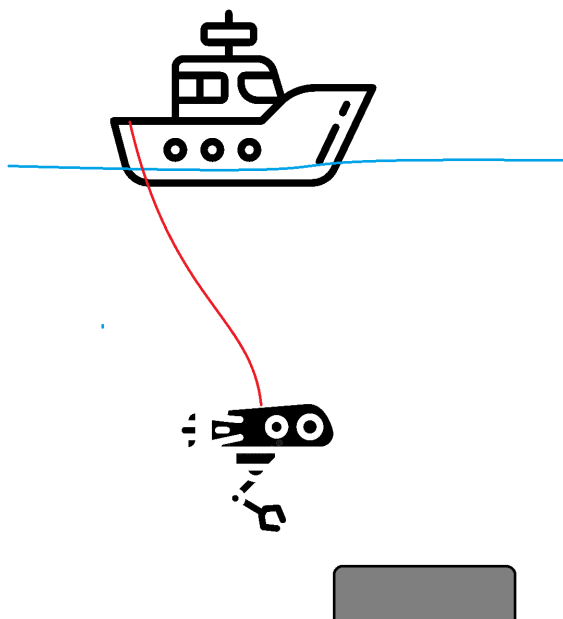


Рис. 3. Подводный аппарат с кабельным соединением

На аппаратах малых и средних глубин видеоинформация передается обычно по отдельным коаксиальным линиям. С увеличением рабочей глубины аппарата и длины кабеля такая схема передачи информации становится невозможной. Многожильные кабели заменяют, начиная с глубины 2000 м, на трос-кабель, состоящий из одной коаксиальной пары.

Не смотря на преимущества, а именно простота в установке и использовании относительно других способов, а также надежность канала связи, такой кабельного канала связи имеет свои ограничения, что существенно сказывается на эффективности подводных роботов. Одна из наиболее существенных проблем – это проблема запутывания кабеля вокруг других подводных объектов. А также планирование пути и навигации зависят от физических свойств кабеля, например, его длина, пропускная способность, зависимость от температуры и т.д.)

Радиочастотные волны по своей природе являются более распространённой и распространённой техникой, используемой для наземной связи, но даже они не подходят для подводной связи, поскольку сильно затухают.

Звук в воде распространяется нелинейно, претерпевая изгибы (рефракция), отражения, сложения и вычитания отраженных копий сигнала (реверберация и многолучевое распространение), доплеровское смещение, а также растяжение и сжатие спектра.

Акустические системы пользуются большим успехом под водой благодаря своей способности общаться на многие километры [3]. Гидроакустический канал имеет принципиальные отличия от радио- и проводных каналов связи. Для него характерны следующие особенности:

- существенная зависимость коэффициента затухания гидроакустических сигналов от частоты;
- малые скорости распространения гидроакустических-сигналов в водной среде;
- многолучевое распространение в неоднородной водной среде, в условиях наличия границ, в мелком море и др.

При функционировании гидроакустических средств передачи информации необходимо учитывать их технические возможности, а при изменении гидроакустических условий и тактической обстановки требуется их адаптация. Например, наиболее достижимый путь обеспечения требуемой достоверности обмена данными – это учет искажений передаваемой информации в ходе сеансов связи и, в случае необходимости, ее повторная передача. Эффективным способом достижения максимальной скорости передачи является увеличение полосы пропускания линии передачи. Для физической реализации модели информационного взаимодействия погруженного аппарата с носителем потребуется гидроакустический модем, применяющийся в системах гидроакустической связи для сопряжения информационного сигнала со средой его распространения рис. 4. Он должен обеспечивать гидроакустическую связь с заданными характеристиками по скорости передачи, дальности взаимодействия, рабочему диапазону частот.

Гидроакустические каналы связи, удовлетворяющие требованию минимизации габаритов, подвержены влиянию помех как естественного, так и искусственного происхождения, особенно в поверхностном слое воды, а каналы связи на сверхдлинных электромагнитных волнах используют для работы антенны, которые во много раз превосходят размеры самого подводного аппарата. Акустические приборы позволяют отправлять и получать сообщения на больших дистанциях, но обмен данными происходит на очень низких скоростях.

Отличительной особенностью данного способа является возможность использовать стационарные надводные и донные гидроакустические ретрансляторы. Используя их, решается задача навигации, зная положения этих маяков можно узнать, где находится подводный аппарат.

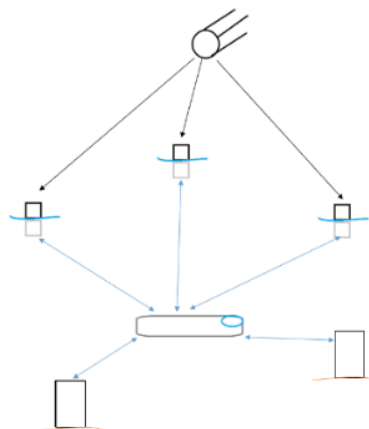


Рис. 4. Подводный аппарат с кабельным соединением

Подводная оптическая беспроводная связь не является новой идеей, но недавно она вызвала новый интерес, поскольку морская вода представляет собой окно с уменьшенным поглощением сине-зеленого света. Благодаря более высокой пропускной способности подводная оптическая беспроводная связь может поддерживать более высокие скорости передачи данных при низких уровнях задержки по сравнению с акустическими и радиочастотными аналогами.

Связь в видимом свете – это технология, которая может решить проблемы гидроакустических и проводных способов связи. В этой технологии спектр видимого света (400–700 нм), используемый для освещения, модулируется для передачи данных. Аналогичный подход используют системы подводной оптической беспроводной связи, в которых потенциальными источниками света являются лазерные диоды вместо светодиодов. Оба варианта источников света чрезвычайно интересны — лазерные диоды из-за их более широкой полосы модуляции по сравнению со светодиодами — в то время как последние из-за их более высокой энергоэффективности, более низкой стоимости и более длительного срока службы кажутся более подходящими для приложений со средней скоростью передачи данных [4].

Основным недостатком подводной оптической связи является то, что вода является средой, сильно поглощающей оптические сигналы; вторая проблема — оптическое рассеяние из-за частиц, присутствующих в море. В любом случае, по отношению к видимому спектру морская вода имеет более низкое поглощение в сине-зеленой зоне. Используя эту физическую особенность, работая с сигналами с длинами волн, относящимися к сине-зеленой области спектра, можно обеспечить высокоскоростное соединение в зависимости от типа воды.

Одно из новейших решений проблем подводной связи недавно появилось в Саудовской Аравии. Университет науки и технологий имени

короля Абдуллы в Саудовской Аравии (KAUST) создал технологию Aqua-Fi. С его помощью водолазы, а значит и роботы, смогут обмениваться данными друг с другом и с устройствами на поверхности.

В статье [5] авторы демонстрируют перенос Интернета в подводную среду путем развертывания маломощной и компактной подводной оптической беспроводной системы под названием Aqua-Fi для поддержки современных интернет-приложений. Aqua-Fi использует светодиод или лазер для поддержки услуг двунаправленной широкополосной связи с различными требованиями, низкой стоимостью и простой реализацией. Светодиоды представляют собой надежные решения для коротких расстояний с низким энергопотреблением. Однако лазер увеличивает расстояние связи и улучшает скорость передачи за счет более высоких требований к мощности. Однако Aqua Porter-Fi отмечает, что в море или океане вода не может оставаться на месте и даже не ощущается на поверхности. Ученые думают о поиске специального приемника сигналов, способного улавливать свет под широким углом.

Кроме теоретического анализа также был собран экспериментальный макет и апробированы некоторые способы связи аппарата с оператором рис. 5. В условиях, в которых недоступны некоторые варианты, были проведены испытания с использованием кабеля, радиопульта, и через дополнительную надводную часть.



Рис. 5. Экспериментальный подводный аппарат

Заключение. Эффективность функционирования подводного робота во многом определяется характером разделения функций управления и обработки поступающей информации между оператором и контроллером робота, управляющий исполнительными механизмами. Существующие способы организации системы связи подводный аппарат-оператор различаются и количеством аппаратуры для обеспечения связи, и дальностью действия, а также относительной простотой использования. Вследствие теоретического анализа и практических экспериментов, для

дальнейших исследований и разработок в сфере подводных аппаратов и их применении будет использоваться кабельный канал связи, так как этот вариант имеет более простой способ подключения, а также при возникновении аварийных ситуаций подводный аппарат можно легко извлечь из среды.

Библиографический список

1. Рыжкова, Д.Н. Проблемы встраиваемости робототехнических комплексов в существующие технологии управления глубоководными морскими объектами / Д.Н. Рыжкова, Д.Ю. Николашин // Техника средств связи. – 2021. – №4 (156).
2. Костенко, В.В. Комбинированная система связи и навигации автономного подводного робота с поплавковым модулем / В.В. Костенко, О.Ю. Львов // Подводные исследования и робототехника. – 2017. – № 1 (23). – С. 31–43.
3. Островский, А.Г. Гидроакустическое оборудование автономных подводных профилирующих аппаратов / А.Г. Островский // Океанологические исследования. – 2018. – №2 (46). – С. 53–68.
4. Чертова, О.Г. Возможные способы организации связи при построении сети морских робототехнических комплексов / О.Г. Чертова, К.В. Новак // Научно-технические проблемы в космических исследованиях Земли. – 2017. – №4.
5. Shihada, B. et al. Aqua-Fi: Delivering Internet Underwater Using Wireless Optical Networks / B. Shihada // IEEE Communications Magazine. – 2020. – Vol. 58, No. 5. – P. 84–89.

ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕОПРЕДЕЛЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

С.А. Сторожев, А.А. Южаков

Рассматриваются способы группового управления переопределенными объектами. Разработан нечеткий групповой регулятор системы автоматического управления подачей топлива в камеру сгорания газотурбинного двигателя, который позволяет учитывать значения сразу нескольких каналов управления при формировании управляющего воздействия. Отличием нечеткого группового регулятора от селективного регулятора является зона совместной работы каналов. Нечеткий групповой регулятор позволяет осуществлять плавное переключение каналов управления.

Ключевые слова: переопределенный объект управления, нечеткий групповой регулятор; метод взвешенного среднего; фаззификатор; дефаззификатор; газотурбинный двигатель; камера сгорания.

Объекты управления, у которых число управляющих воздействий l меньше чем число управляемых координат m называются переопределенными (рис. 1) [1].

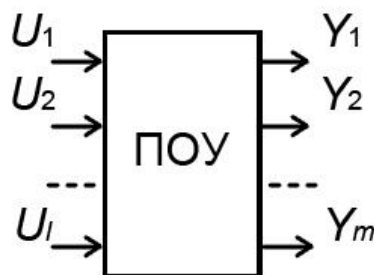


Рис. 1. Переопределенный объект управления

Системы автоматического управления переопределенными объектами должны решать задачу выработки необходимых управляющих воздействий для соблюдения требований по точности и надежности. Примером системы автоматического управления (САУ) переопределенным объектом, является САУ подачей топлива в камеру сгорания газотурбинного двигателя (ГТД) [2], представленная на рис. 2. Она содержит одно управляющее воздействие – количество топлива в камере сгорания « G_t » и две управляемых координаты – частота оборотов вентилятора « n_v » и производная оборотов вентилятора « dn_v ».

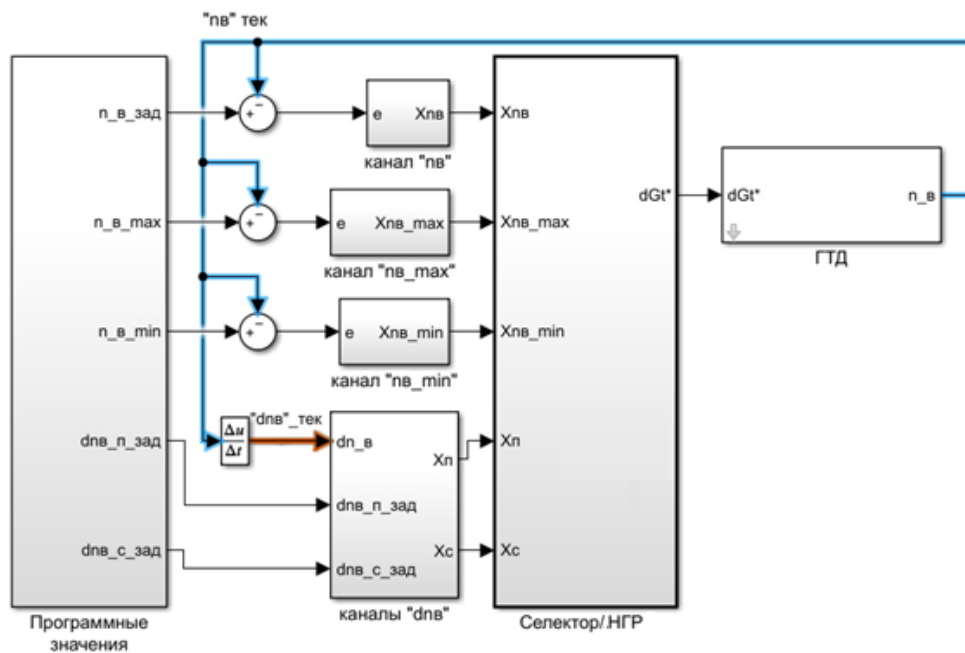


Рис. 2. Структурная схема САУ подачи топлива в камеру сгорания ГТД с селектором, где «канал «пв»», «канал «пв_max»», «канал «пв_min»», «каналы «дпв»» - каналы управления САУ ГТД; «Селектор/НГР» - устройство формирования управляющего воздействия на дозатор ГТД

Для формирования управляющего воздействия используются 5 каналов управления:

1 – канал частоты вращения вентилятора «пв» (основной регулятор режима);

2 – канал максимальной частоты вращения вентилятора «пв_max» (канал ограничения по максимуму);

3 – канал минимальной частоты вращения вентилятора «пв_min» (канал ограничения по минимуму);

4 – канал приемистости ускорения частоты вращения вентилятора «дпв_п» (канал разгона);

5 – канал сброса ускорения частоты вращения вентилятора «дпв_с» (канал сброса).

На рис. 3 представлено устройство формирования управляющего воздействия – селектор.

Операции получения минимального сигнала соответствует операция конъюнкции, а операции получения максимального сигнала – операция дизъюнкции [3]:

$$U_{\min} = \min\{U_1, U_2, \dots, U_m\} = U_1 \wedge U_2 \wedge \dots \wedge U_m = \bigwedge_{i=1}^m U_i, \quad (1)$$

$$U_{\max} = \max\{U_1, U_2, \dots, U_m\} = U_1 \vee U_2 \vee \dots \vee U_m = \bigvee_{i=1}^m U_i. \quad (2)$$

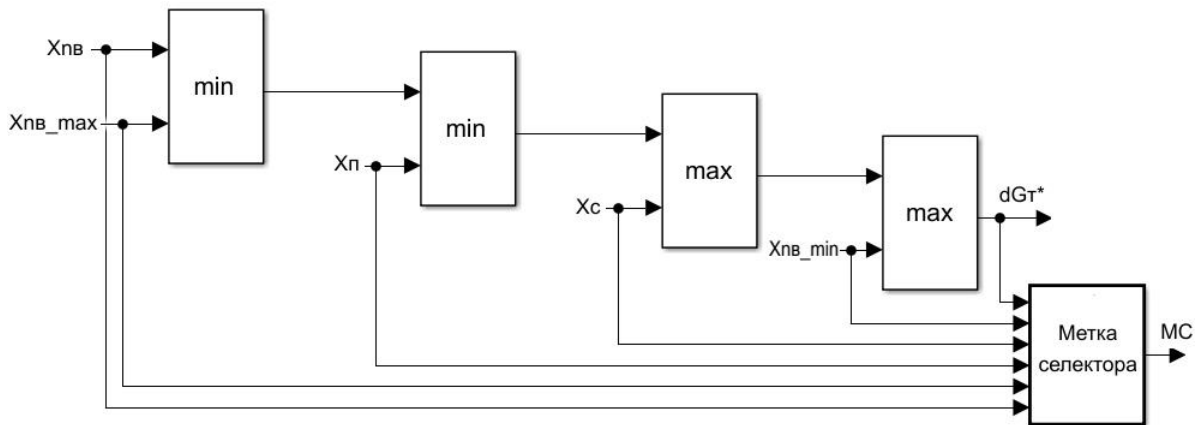


Рис. 3. Структурная схема селектора, где «Xпв», «Xпв_max», «Xпв_min», «Xп», «Xс» - управляющие воздействия каналов управления; «min», «max» - элементы на базе многозначной логики; «Метка селектора» - устройство для индикации работы каналов; «МС» - осциллограф; «dГт*» - управляющее воздействие на дозатор топлива в камеру сгорания ГТД

Операции конъюнкции и дизъюнкции могут быть представлены в терминах алгебраических операций. Конъюнкция и дизъюнкция в общем виде для двух величин представлены в виде

$$U_{\min} = \min\{U_1, U_2\} = U_1 \wedge U_2 = \frac{1}{2}(U_1 + U_2 - |U_1 - U_2|), \quad (3)$$

$$U_{\max} = \max\{U_1, U_2\} = U_1 \vee U_2 = \frac{1}{2}(U_1 + U_2 + |U_1 - U_2|). \quad (4)$$

Выход селектора «dГт*» формируется следующим образом:

- 1) определяется минимум между значением 1-го канала («Xпв») и значением 2-го канала («Xпв_max»);
- 2) определяется минимум между результатом «1)» шага и значением 4-го канала «Xп»);
- 3) определяется максимум между результатом «2)» шага и значением 5-го канала («Xс»);
- 4) определяется максимум между результатом «3)» шага и значением 3-го канала («Xпв_min»);

Метка селектора отображает работу каналов управления. В селекторе в каждый момент времени может работать только один канал.

Выбранный селектором канал управления вступает в работу, а обратные связи остальных каналов разрываются, что является недостатком использования многозначной логики.

Предлагается заменить элементы, работающие на многозначной логике из которых состоит селектор на элементы на базе нечеткой логики из которых состоит нечеткий групповой регулятор (НГР), представленный на рис. 4.

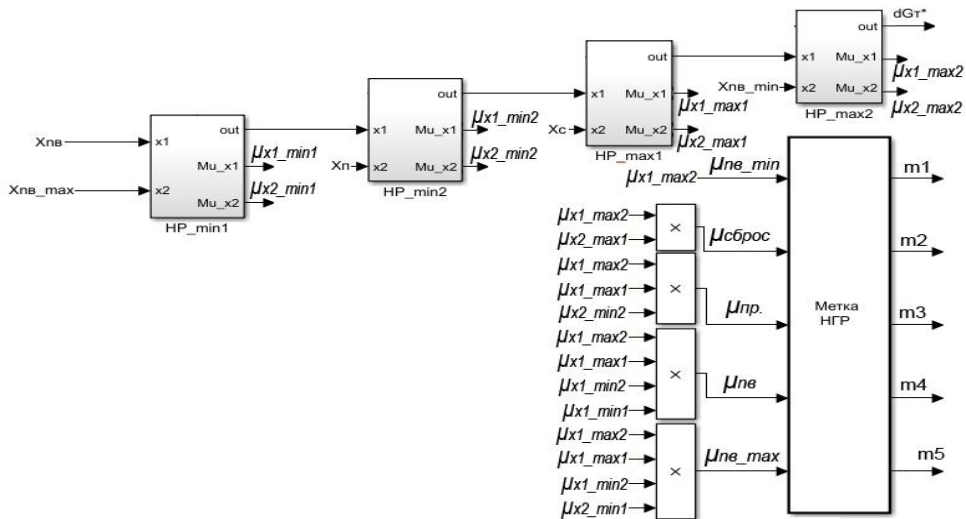


Рис. 4. Структурная схема нечеткого группового регулятора, где «Xnb», «Xnb_max», «Xnb_min», «Xп», «Xс» - управляющие воздействия каналов управления; «HP_min», «HP_max» - нечеткие регуляторы по минимуму и по максимуму; «Метка НГР» - устройство для индикации работы каналов; «dGt*» - управляющее воздействие на дозатор топлива в камеру сгорания ГТД

Идея применения нечетких регуляторов по минимуму и по максимуму взамен многозначной логики заключается в том, что выход нечеткого регулятора формируется, учитывая оба входных значения в том случае, когда разница между входными значениями небольшая. Замена многозначной логики на нечеткие регуляторы позволяет осуществлять плавное переключение каналов управления. Структура нечетких регуляторов по минимуму и по максимуму приведена на рис. 5.

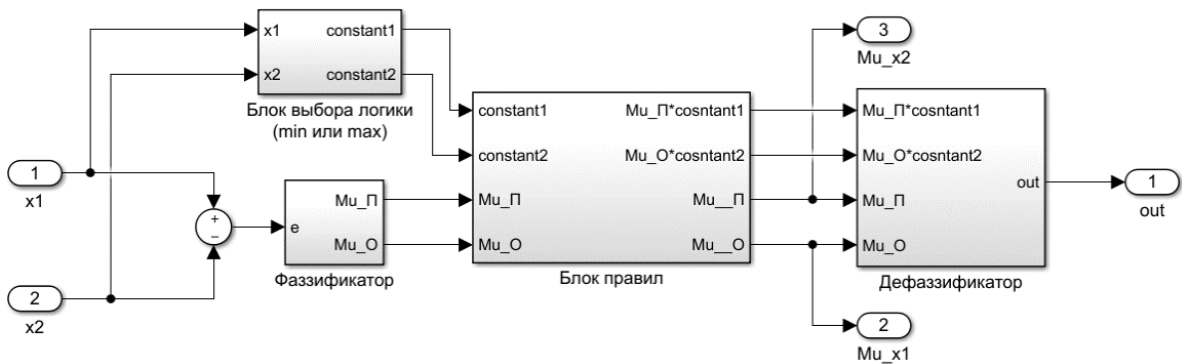


Рис. 5. Структурная схема нечеткого регулятора по минимуму (по максимуму), где «x1», «x2» - входы нечеткого регулятора; «e» - отклонение входа «x2» от входа «x1»; «Mu_P» - степень принадлежности к терм-множеству «П»; «Mu_O» - степень принадлежности к терм-множеству «О»; «constant1», «constant2» - выходы правил; «Mu_x1», «Mu_x2» - значения степеней принадлежности фаззификатора для нечеткого регулятора по минимуму (для нечеткого регулятора по максимуму они меняются местами); «out» - выход нечеткого регулятора

Настройкой нечеткого регулятора является параметр «а», он определяет ширину пересечения терм-множеств фаззификатора «О» и «П» (см. рис. 6). Такая структура фаззификатора позволяет учитывать оба входа «x1» и «x2» при формировании выхода нечеткого регулятора.

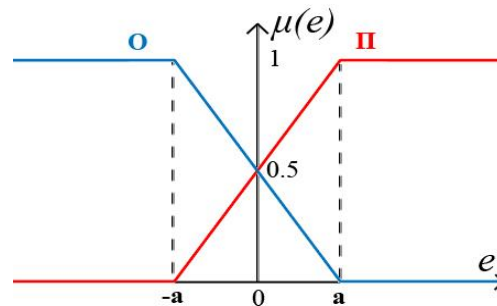


Рис. 6. Фаззификатор нечеткого регулятора, где «e» - отклонение входа «x2» от входа «x1»; «μ(e)» - степень принадлежности; «О», «П» - терм-множества; «а» - параметр нечеткого регулятора

Математическое описание терм-множеств «О» и «П» приведено в [4] и имеет вид

$$\mu_{\Pi}(e, a) = \begin{cases} 0, & e \leq -a; \\ \frac{e+a}{2 \cdot a}, & -a < e < a; \\ 1, & e \geq a; \end{cases} \quad \mu_{O}(e, a) = \begin{cases} 1, & e \leq -a; \\ \frac{a-e}{2 \cdot a}, & -a < e < a; \\ 0, & e \geq a. \end{cases} \quad (5)$$

После фаззификации, степени принадлежности «μ_О», «μ_П» и выходы правил «constant1», «constant2» поступают в блок правил. Блок правил содержит два правила:

Для нечеткого регулятора по минимуму:

- 1) если «e» (разность «x1» и «x2») положительная, то выход равен «constant1» (т.е. «x2») (Если «e» = «П», то «x2»);
- 2) если «e» отрицательная, то выход равен «constant2» (т.е. «x1») (Если «e» = «О», то «x1»).

Для нечеткого регулятора по максимуму:

- 1) если «e» положительная, то выход равен «constant1» (т.е. «x1») (Если «e» = «П», то «x1»);
- 2) если «e» отрицательная, то выход равен «constant2» (т.е. «x2») (Если «e» = «О», то «x2»).

Дефаззификация происходит по методу среднего взвешенного [4]:

$$out = \frac{\mu_{\Pi} \cdot constant1 + \mu_{O} \cdot constant2}{\mu_{\Pi} + \mu_{O}}. \quad (6)$$

Результаты моделирования САУ подачей топлива в камеру сгорания ГТД с селектором и НГР на «максимальном режиме» [2] приведены на рис. 7.

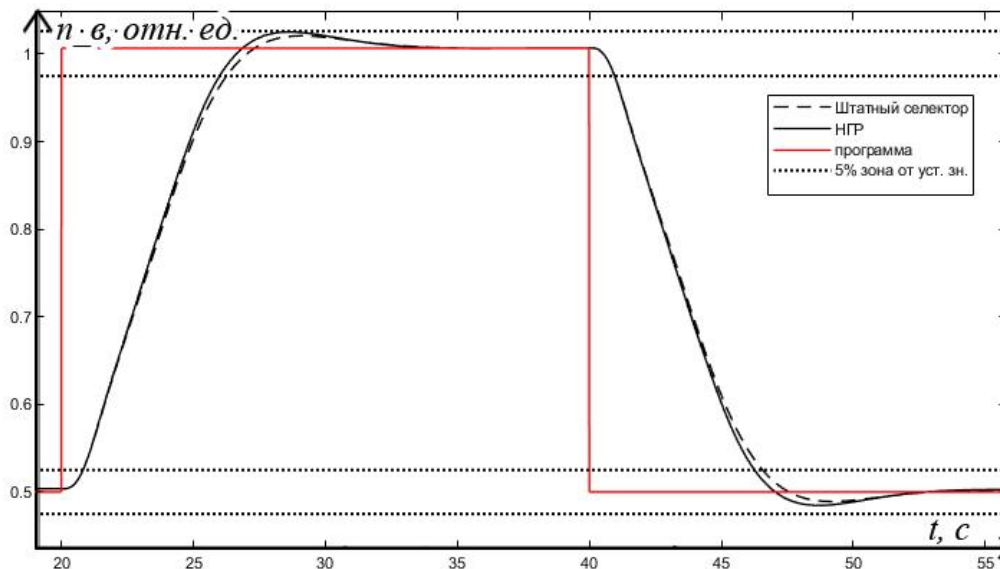


Рис. 7. Сравнение оборотов вентилятора «n_v» САУ ГТД с селектором и НГР

Время переходного процесса (t_1 и t_2) – это время, при котором переходный процесс по выходной координате достигает 5%-ной зоны от устойчивого значения. Перерегулирование ($\sigma_1\%$ и $\sigma_2\%$) – это процентное соотношение разницы максимального значения и установившегося значения и разницы установившегося значения и начального значения (7) [4]

$$\sigma\% = \frac{|h_{max} - h_{уст}|}{h_{уст} - h_0} = \frac{|h_{max} - h_{уст}|}{dh} \quad (7)$$

Показатели качества сведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели качества САУ подачей топлива в камеру сгорания ГТД

Регулятор	t_1, c	$\sigma_1\%$	t_2, c	$\sigma_2\%$
Селектор	6,26	4,2	6,57	2,2
НГР	5,89	4,5	6,16	2,4

На рис. 8 приведена метка селектора, она отражает работу того или иного канала в каждый момент времени.

При использовании селектора в каждый момент времени может работать только один канал. На приемистости работает 4-й канал («dпв_п»), а на сбросе 5-й («dпв_с»).

В отличие от селектора, в формировании управляющего воздействия НГР учитываются несколько каналов в зависимости от значения степеней принадлежности «Mnv», «Mnv_max», «Mnv_min», «Mp», «Ms» (см. рис. 9).

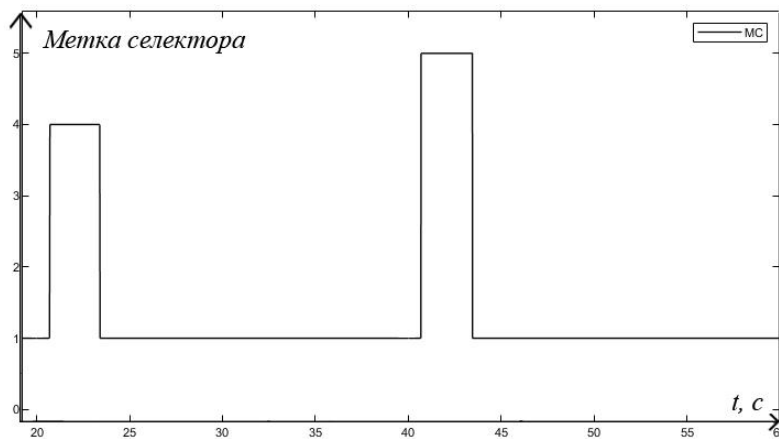


Рис. 8. Метка селектора

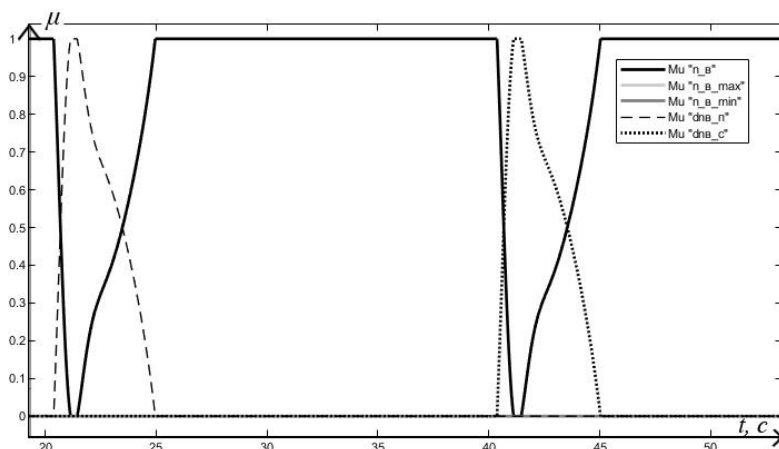


Рис. 9. Степени принадлежности НГР

На приемистости при формировании управляющего воздействия учитываются значения 1 канала (частота вращения вентилятора «n_в») и 4 канала (приемистость ускорения частоты вращения вентилятора «dnp_п»), а на сбросе значения 1 канала и 5 канала (сброс ускорения частоты вращения вентилятора «dnp_с»).

Заключение. Анализ результатов моделирования САУ ГТД с селектором и НГР показал:

- НГР уменьшает время переходного процесса на приемистости на 0.37 с и на сбросе на 0.41 с, при этом увеличивается перерегулирование на приемистости на 0.3% и на сбросе на 0.2% по сравнению с селектором;

- НГР позволяет учитывать несколько значений каналов при формировании управляющего воздействия.

Для определения оптимального варианта управления построена следующая целевая функция [5]:

$$F = 0.7 \cdot (\sum \dot{t}_1 + \sum \dot{t}_2) + 0.3 \cdot (\sum \dot{\sigma}_1 \% + \sum \dot{\sigma}_2 \%) \rightarrow \min \quad (8)$$

где $\dot{t}_1, \dot{\sigma}_1\%$ - нормированные значения показателей качества при первом изменении программного значения оборотов вентилятора «п_в»; $\dot{t}_2, \dot{\sigma}_2\%$ - нормированные значения показателей качества при втором изменении программного значения оборотов вентилятора «п_в».

Далее, выполняется нормализация показателей качества путем деления значений таблицы 1 на максимальное значение в столбце. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Нормированные показатели качества

Регулятор	t_1	σ_1	t_2	σ_2
Селектор	1	0,933333	1	0,916667
НГР	0,940895	1	0,937595	1

Целевая функция каждого регулятора имеет следующие значения:

$$F_{\text{селектор}} = 1.955; F_{\text{НГР}} = 1.915.$$

По показаниям целевой функции, НГР улучшает качество управления на 2.05% по сравнению с селектором.

Намечены направления дальнейших исследований по развитию проблем САУ переопределенными объектами управления, в том числе представляется целесообразным расширить исследование в области группового управления каналами САУ ГТД, а именно, рассмотреть проблему адаптивного нечеткого управления.

Библиографический список

1. Цыпкин, Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1968. – 400 с.
2. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. / В.И. Гостев. –К.: Радиомотор, 2008. – 972с.
3. Гинзбург, С.А. Математическая непрерывная логика и изображение функций / С.А. Гинзбург. – М.: Энергия, 1968. – 136 с.
4. Хижняков Ю.Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие / Ю.Н. Хижняков. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 303 с.
5. Сторожев, С.А. Селективное управление газотурбинным двигателем [Текст] / С.А. Сторожев, А.А. Южаков, Ю.Н. Хижняков, В.С. Никулин // Электротехника. – 2020. – № 11. – С. 18–21.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОУДАРА В АКСИАЛЬНО-ПЛУНЖЕРНОМ НАСОСЕ

Е.А. Третьякова

В работе представлен подход к моделированию аксиально-плунжерного насоса (АПН) и выполнен гидродинамический расчет. В ходе моделирования была вычислена амплитуда скачка давления во время гидроудара на рабочем режиме насоса. Был предложен метод по его снижению. Внесены изменения в конструкцию плунжера. Проведен расчет на прочность измененной конструкции.

Ключевые слова: аксиально-плунжерный насос, гидродинамический расчет, модель, плунжер, сетка, удар, клапан.

Введение. Аксиально-плунжерные гидромашины (АПГ) – один из типов объемных гидромашин, широко используемых в качестве гидронасосов или гидро-моторов в авиационной и строительной технике, а также станкостроении, где требуется малая подача рабочей жидкости при достаточно высоких ее напорах. Также важно отметить компактность и малый вес по сравнению с другими конструкциями поршневых насосов (рис.1). Малые детали и расположение камер вдоль приводного вала дают меньшие вибрации и низкую инерцию.

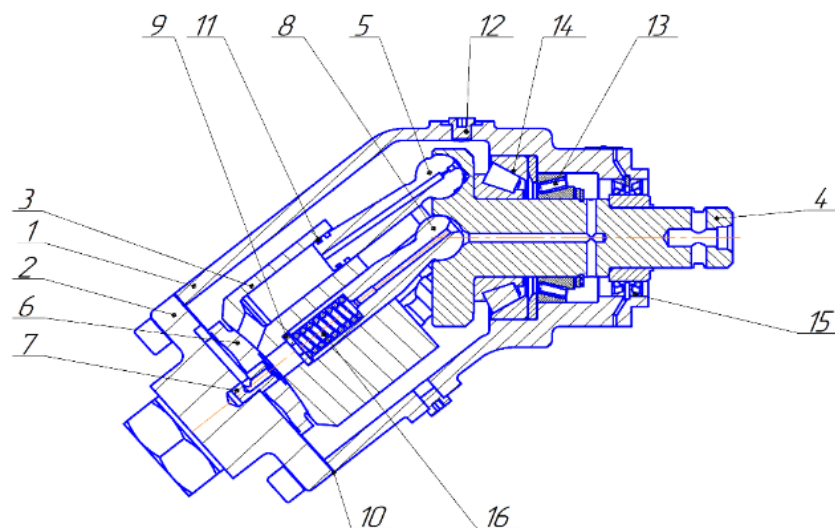


Рис. 1. Аксиально-плунжерный насос

- 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – блок цилиндров; 4 – вал; 5 – плунжер;
6 – торцевой распределитель; 7 – штифт; 8 – сферическая часть оси; 9 – упор;
10 – уплотнение; 11 – уплотнение цилиндров плунжеров; 12 – заглушка;
13 – радиально-упорный подшипник; 14 – радиально-упорный подшипник

Насосы объемного типа широко распространены в различных гидросистемах из-за свойственной им независимости генерируемого расхода от давления в системе и частоты вращения приводного вала. Принцип работы объемных гидромашин основан на периодическом изменении объема рабочих камер, что приводит к пульсациям подачи, которые в свою очередь приводят к вибрации ограждающих элементов. Такие динамические нагрузки приводят к вибрации, нарушению герметичности и разрушению системы.

На сегодняшний день исследования по уменьшению динамических нагрузок ведутся в разных направлениях. В работе рассматривается подход, связанный с созданием динамической модели с целью выявления природы и направленности гидроудара для дальнейшей его компенсации.

Литературный обзор. В ходе анализа существующих моделей аксиально-плунжерного насоса было выделено две основных группы исследований. Локальное математическое моделирование создается для того, чтобы показать линии тока жидкости в определенной области объекта. Данные модели служат для рассмотрения процессов в относительно небольших объемах, таких как: канавки, зазоры, каналы всасывания или нагнетания, ходовая часть (например, расчет спроектированного нагнетательного канала или же моделирование течения жидкости в цилиндре) [3, 4, 6–9]. Обобщенное моделирование показывает динамику течения жидкости в гидравлической системе, учитывая трубопроводы и дополнительные элементы [1, 5]. Обычно данные модели используются для получения пульсационной картины и часто сопровождаются данными эксперимента (например, моделирование насоса с целью изучения дросселирующего отверстия). В данных моделях отличительными допущениями являются упрощенное движение плунжеров и отсутствие зазоров. Важным аспектом является то, что во многих работах говорилось о явлении *гидроудара*, который проявлялся в скачкообразном поведении графиков расхода, однако не было четкого представления о его величине и направленности. Из анализа существующих модификаций плунжера можно сделать вывод об их немногочисленности [10].

Процесс моделирования. В рамках данного исследования проведено моделирование рабочего процесса аксиально-плунжерного гидронасоса компакт-серии для 1 плунжера. Необходимо обозначить допущения, которые принимались при данном моделировании.

1. Несжимаемая жидкость. Данная модель сплошной среды подразумевает сохранение плотности при изменении давления. Сжимаемость среды показывается процентным содержанием воздуха в ней и важна для анализа кавитации в насосе. Данное допущение оправдывается ограниченными вычислительными ресурсами и незначительным влиянием

на изучаемый процесс. При определении явления отрицательного гидроудара (при резком открытии задвижки) нет необходимости учитывать сжимаемость жидкости, так как нет образования кавитационных процессов.

2. Температура. В данной имитационной модели учитывалась стандартная (по настройкам Fluent) температура рабочего тела. Параметры, зависящие от температуры, (плотность и вязкость жидкости) принимались при $t=20$ °С. Это обосновывается тем, что действительная температура рабочего тела во время процесса неизвестна. Очевидно, реальная температура превышает принимаемую, что, в свою очередь, повлияет на амплитуду удара. Рабочий процесс приводит к повышению температуры, от чего проявляется уменьшение вязкости и плотности (т.е. уменьшение способности жидкости сопротивляться сторонним воздействиям), результатом является увеличение амплитуды гидроудара.

Данная погрешность результатов не скажется при подходе к модификации плунжера, так как расчет демпфирующих и упругих сред будет идти по наименьшему давлению (если рассчитать для меньшего давления, то будет функционировать при более высоком).

3. Геометрические допущения в виде отсутствия канавок и дросселирующих отверстий в распределительном блоке. Учет данных модификаций распределительного блока значительно усложнил бы процесс создания модели и сетки. А также расчет канавок и их эффективность не входит в тему данной работы. Главная задача – смоделировать рабочий процесс АПГ и провести модификацию плунжера.

4. Допущение геометрии и движения плунжера. В данной работе принималась идеализированная цилиндрическая форма плунжера: без осевого канала и не коническая, что значительно упрощает создание сетки. Также не учитывается радиальное биение, что упрощает задание движения.

5. Утечки. При моделировании соблюдалась идеальная изоляция как зон нагнетания и всасывания, так и цилиндра с пространством внутри корпуса. Перетечки между окнами нагнетания и всасывания в торцевом распределителе являются незначительными, а утечки через противоположный торец цилиндра влияют на полученные результаты расхода. В этом случае, правильность полученного расхода мы сможем проверить через теоретический расход насоса.

Создание динамической модели удобно разбить на этапы. На первом этапе моделирования была создана жидкостная модель для расчета по твердотельной. Модель разбита на 3 тела: зона нагнетания, зона всасывания (что называется статор) и цилиндры с каналами – ротор.

Второй этап представляет собой создание сетки. Конечная сетка модели состоит из 4 тел (рис. 2). Сетка имеет максимальный коэффициент

скошенности 0,65, а средний 0,15, что говорит о ее качественности. Всего в сетке 148.734 элемента.

Третий этап включает в себя создание макросов (UDF – файлы) на платформе Microsoft Visual Studio 2012. Путем проб и ошибок было выявлено преимущество вращения тела «статор», а не «ротор». Это обосновывается визуальным представлением результатов. Закон движения плунжеров синусоидальный.

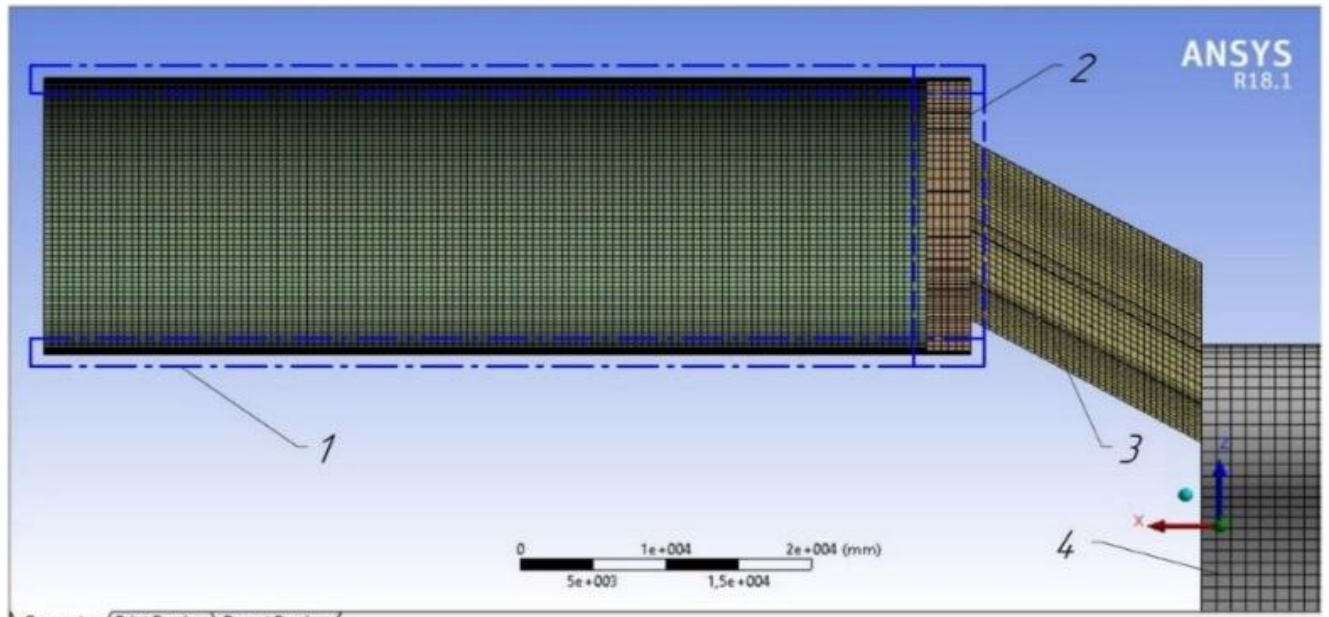


Рис. 2. Сетка модели: 1 - зазор, 2 - область перемещения плунжера, 3 – подвод, 4 – области нагнетания и всасывания

На четвертом этапе сетка выгружается во Fluent 18.1, где происходит задание параметров расчета, граничных условий и макросов движения. Важной частью данного этапа является грамотная настройка параметров перестраиваемой сетки (Dynamic Mesh) и подбор разбиения для рабочего цикла (2900 шага). Это связано с функцией динамической сетки: необходимо создать такое перемещение тела (создаваемой сетки), чтобы оно было меньшим, чем сам размер сетки для правильного выполнения «Layering» и перестроения сетки.

Анализ полученных результатов. Можно отметить, что давление начало возрастать на 1533 шаге, максимальное значение составляет $P = 46,5$ Мпа в теле подвод (рис. 2) на 1557 шаге, что превышает давление зоны нагнетания на $\Delta P = 11,5$ Мпа (составляет 32,9% от давления зоны нагнетания), см. рис. 3.

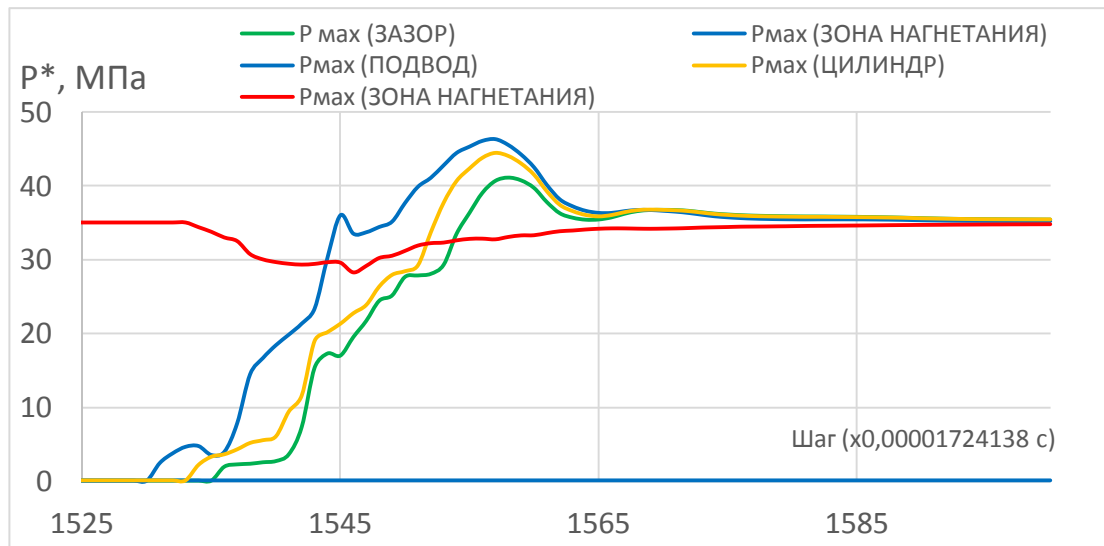


Рис. 3. График зависимости полного давления от шага

Важно рассмотреть поле распределения давления и векторное направление скорости потока (рис. 4). Векторы направлены в сторону цилиндра, следовательно, основной удар приходится именно на него, т.е. на плунжер.

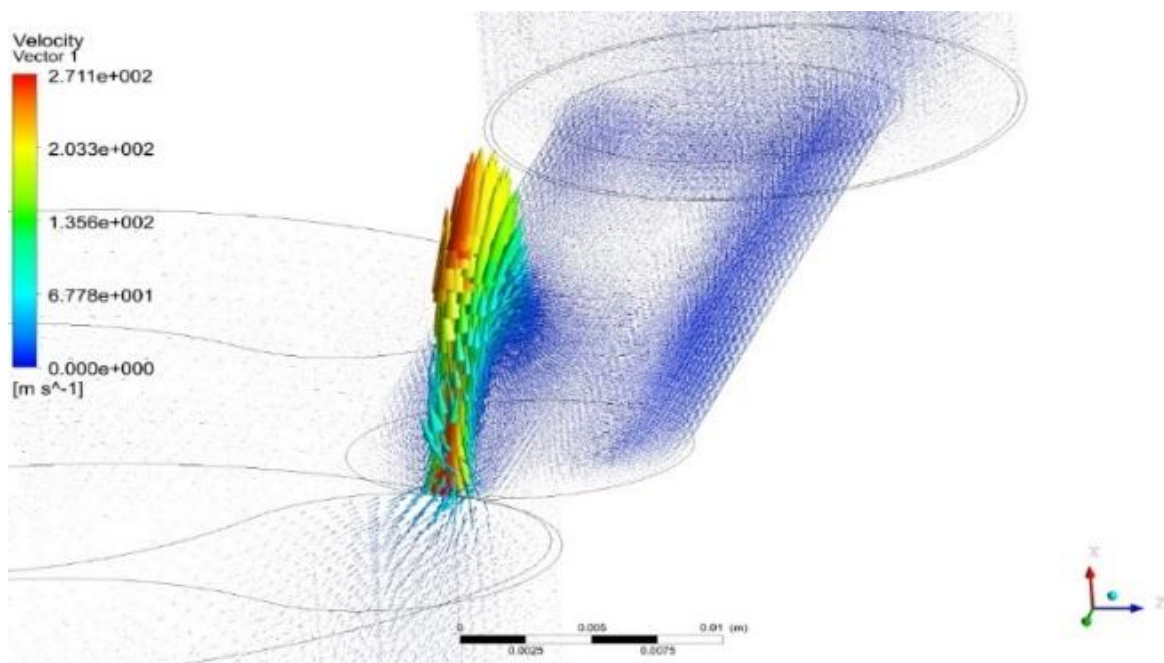


Рис. 4. Векторы скорости потока в момент гидроудара

Резкий скачок параметров сказывается и на картине расхода (рис. 5). На графике можно увидеть кратковременные пики расхода.

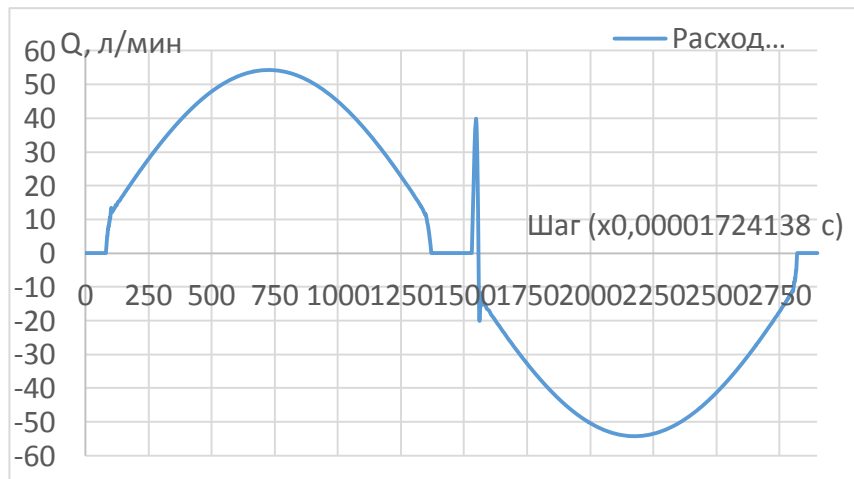


Рис. 5. График расхода жидкости для 1 плунжера, л/мин

Среднее значение расхода в данной модели можно определить из графика путем деления разницы максимального и минимального значений пополам, то есть на один плунжер приходится теоретический расход, равный

$$Q_{\text{сред } 1}^{\text{теор}} = \frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{2} = \frac{53.44 - 13}{2} = 20,22 \text{ л/мин.}$$

Для определения смоделированного полного расхода для аксиально-плунжерного насоса необходимо полученный средний теоретический расход умножить на количество плунжеров ($z = 7$):

$$Q_{\text{сред}}^{\text{теор}} = Q_{\text{сред } 1}^{\text{теор}} \cdot z = 20,22 \cdot 7 = 141,54 \text{ л/мин.}$$

Безусловно, данное допущение является грубым, так как не учитываются перетечки между плунжерами во время их одновременного перекрывания зоны нагнетания, однако этого достаточно для оценки порядка расхода и, следовательно, правильности моделирования. Для данной проверки сравнивается смоделированный расход и значение теоретического расхода, которое получено аналитическим путем.

Данное значение соответствует теоретической величине расхода (без учета объемных потерь). Сравнивая его с величиной, рассчитанной аналитически, которая равна

$$Q_m = \frac{Q_{\text{эф}}}{\eta_0} = \frac{7,5}{0,97} = 7,73 \frac{\text{м}^3}{\text{час}} = 0,13 \frac{\text{м}^3}{\text{мин}} = 130 \frac{\text{л}}{\text{мин}}.$$

Разница значений в 8,9% говорит о правильном функционировании модели.

Модификация конструкции. Полученные данные о величине удара и его направлении дают основания для его компенсации путем демпфирования: резкий скачок давления гасится упругой средой или механизмом. При условии наличия необходимых материалов можно

расположить демпфирующий, невпитывающий материал внутри плунжера или демпфирующая среда, в которой бы находилась сферическая головка плунжера. Упругое демпфирование мест соприкосновения плунжера с управляющим валом позволит компенсировать вибрации в сторону ответственного органа системы. Данные идеи пока имеют только теоретический характер. Для осуществления упругой компенсации гидроудара также можно рассмотреть предохранительный клапан с пружиной (рис. 6).

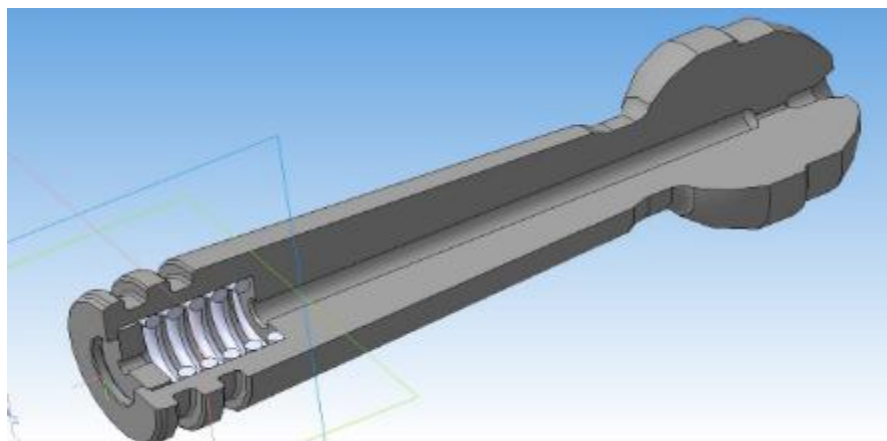


Рис. 6. 3D-модель предложенной модификации

Данная конструкция была рассчитана на прочность в программе ANSYS Workbench 18.1. Основное тело модифицированного плунжера было разбито на элементы размера 1 мм, а места с содержанием концентраторов напряжений, острых кромок по 0,2 мм. Пружина проходит расчет на прочность. Но запирающий элемент и корпус плунжера не проходят по коэффициенту запаса текучести. Небольшая разница коэффициентов запаса от минимальных необходимых показывает возможность доработки конструкции.

Заключение. Проведен подробный анализ явления гидроудара и показана необходимость его исключения. Осуществлен анализ имеющихся подходов динамического моделирования АПГ и конструкций плунжеров.

Выполнен динамический расчет рабочего процесса аксиально-плунжерного насоса. Результатами являются графики расхода и давлений, динамическое представление процесса гидроудара и деформации пружины в предохранительном клапане. Определена амплитуда гидроудара $\Delta P = 11,5$ Мпа, который на 32,9% превышает значение давления зоны нагнетания.

Выдвинуты методы, направленные на борьбу с гидроударом. Проведен анализ на прочность одной из предложенных конструкций. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых и модификации имеющихся аксиально-плунжерных гидромашин (АПГ).

Библиографический список

1. Zhang, Bin. Analysis of the flow dynamics characteristics of an axial piston pump based on the computational fluid dynamics method / Bin Zhang, Jien Ma, Haocen Hong, Huayong Yang and Youtong Fang // Journal of aeronautics. Engineering applications of computational fluid mechanics. – 2017. – Vol. 11. – P. 86–95.
2. Родионов, Л.В. Методические указания для курсового проекта «Проектирование объемного насоса» метод. указания / Л.В. Родионов и др. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 32 с.
3. Пузанов, А.В. Гидромеханический анализ ходовой части аксиально-поршневой гидромашины / А.В. Пузанов // Вестник Брянского государственного технического университета. Брянский государственный технический университет. – 2016. – № 4. – С.161–169.
4. Edge, K.A. Cylinder pressure transients in oil hydraulic pump with sliding plate valves / K.A. Edge, BSc, PhD, CEng, MI MechE and J Darling. – School of Engineering, University of Bath, 2016 – 45 p.
5. Николенко, И.В. Математическое моделирование рабочего процесса в гидроприводе на основе регулируемых аксиально-поршневых гидромашин / И.В. Николенко, А.Н. Рыжаков // Наука и образование. МГТУ им. Баумана. – 2015.— № 9. – С. 17–31.
6. Пузанов, А.В. Моделирование индикаторной диаграммы аксиально-плунжерной гидромашины / А.В. Пузанов, Е.А. Ершов // Вестник Брянского государственного технического университета. Брянский государственный технический университет. – 2017. – № 3 (56). – С. 29–35.
7. Белов, Н.А. Профилирование проточной части нагнетательного канала аксиально-поршневого насоса / Н.А. Белов, О.Ф. Никитин. –М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 53 с.
8. Changbin, G. Theoretical study of flow ripple for an aviation axial-piston pump with damping holes in valve / Guan Changbin, Jiao Zongxia, HE Shouzhan // Journal of aeronautics. School of Automation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China, 2013. – 182 p.
9. Berta, G.L. Simulation model of axial piston pumps inclusive of cavitation / G.L. Berta, P Casoli, A Vacca // Proceedings of Fluid Power Systems and Technology Division (FPSTD) ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2015.
10. Ivantysynova, Monika. The Piston Cylinder Assembly in Piston Machines / Monika Ivantysynova // a long Journey of Discovery Maha Fluid Power Research Center, Purdue University, USA, 2013. – 25 p.

ФОРМИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ БПЛА В СРЕДЕ MATLAB

П.М. Трефилов

Приведены результаты имитационного моделирования процессов ориентации и навигации бортового навигационного комплекса БПЛА в среде MATLAB. Представлены математические модели погрешности инерциальной навигационной системы, представлены модели погрешностей. Представлен синтез алгоритмов ориентации и навигации БПЛА.

Ключевые слова: БПЛА, ориентация, навигация, погрешность, модель, акселерометр, гироскоп.

Для решения задач ориентации и навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в подавляющем большинстве случаев используются инерциальные и спутниковые навигационные системы, работающие в едином контуре управления. Из всех навигационных систем инерциальные навигационные системы (ИНС) являются единственными, которые наилучшим образом удовлетворяют целому комплексу таких важных требований, как универсальность, полная автономность, помехозащищенность и помехоустойчивость, а также скрытность работы. Вместе с тем, уже при существующем уровне развития техники эти системы могут обеспечивать достаточную высокую точность навигации, которая ограничивается только точностью датчиков первичной информации и будет повышаться по мере их совершенствования. Физические принципы инерциальной навигации неразрывно связаны с решением основной задачи динамики: при известных силах, действующих на тело, а также его начальном положении и скорости необходимо определить его положение в любой момент времени относительно выбранной системы отсчета. Решение этой задачи разбивают на два этапа:

- 1) определение движения центра масс;
- 2) определение движения тела вокруг центра масс.

Предположим, что на движущейся вблизи поверхности Земли объекте установлен трехкомпонентный акселерометр. Модель такого акселерометра можно представить в виде материальной точки единичной массы (чувствительного элемента), установленной в трехкомпонентном упругом подвесе.

При решении задач общей теории инерциальной навигации движение этой материальной точки рассматривается как поступательное движение

объекта. Математические модели кинематики и динамики подобных объектов описаны в статье [1]. Кроме того, считают, что на чувствительный элемент (ЧЭ) акселерометра действует две силы – сила притяжения Земли и сила упругой деформации подвеса.

Начало инерциальной системы координат свяжем с центром Земли. Одну из этих осей направим вдоль оси собственного вращения Земли. Уравнение движения ЧЭ акселерометра в этой системе координат запишем в виде

$$\begin{cases} \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{V}; \\ \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{g}(\vec{r}) + \vec{n}, \end{cases}$$

где \vec{r} – радиус-вектор, соединяющий ЧЭ с началом инерциальной системы координат; \vec{V} – скорость ЧЭ в инерциальной системе координат; \vec{n} – упругая сила подвеса; \vec{g} – вектор гравитационного ускорения Земли в точке положения ЧЭ. $\vec{g}(\vec{r}) = \frac{\mu\vec{r}}{r^3}$, μ – константа.

Ориентация осей, связанных с корпусом акселерометра, определяется с помощью гироскопов. В простейшем случае акселерометр может быть установлен на гиростабилизированной платформе, сохраняющей заданную ориентацию в инерциальной системе координат. Интегрирование уравнения, представленного выше можно выполнить в системе координат, связанной с корпусом акселерометра, который вращается относительно инерциальной системы координат с произвольной угловой скоростью ω . Если угловая скорость $\vec{\omega}$ известна (например, по показаниям гироскопических датчиков угловой скорости) как функция, \vec{V} , t , то интегрирование уравнений дает координаты и скорость БПЛА в системе координат с началом в центре Земли и осями, параллельными осям корпуса акселерометра [2].

В общем случае система автономной инерциальной навигации может быть реализована с помощью следующих основных функциональных элементов:

- трехкомпонентного акселерометра или эквивалентных ему трех однокомпонентных акселерометров;
- гиростабилизированной платформы или системы свободных гироскопов или системы датчиков абсолютной угловой скорости;
- вычислительного устройства, содержащего информацию о времени.

Первые две группы элементов (первичные преобразователи или чувствительные элементы) вырабатывают текущую информацию о компонентах векторов \vec{n} и $\vec{\omega}$ (о векторах кажущегося ускорения и абсолютной угловой скорости вращения ЛА). Задачей вычислительного

устройства является решение систем дифференциальных уравнений, то есть моделирование движения на основе измеренных параметров акселерометров и гироскопов и изменения взаимной ориентации подвижного и неподвижного трехгранников. Для этого в вычислительное устройство должна быть введена информация в виде функции $\vec{g}(\vec{r})$, об угловой скорости вращения Земли, о параметрах формы Земли так далее.

В разработанной модели ИНС представлена следующая математическая модель погрешности. В матричной форме модель ошибок ИНС представлена в виде:

$$\frac{d\delta X_{\text{ИНС}}}{dt} = F_{\text{ИНС}}\delta X_{\text{ИНС}} + GV_{\text{ИНС}}w_{\text{ИНС}},$$

где $\delta X_{\text{ИНС}}$ – вектор состояния модели ошибок ИНС (15 x 1);

$$\delta X_{\text{ИНС}} = \begin{pmatrix} \delta North & \delta Height & \delta East \\ \delta V_{North} & \delta V_{Height} & \delta V_{East} \\ \delta Roll & \delta Yaw & \delta Pitch \\ \delta Acc_{0X} & \delta Acc_{0Y} & \delta Acc_{0Z} \\ \delta Gyro_{0X} & \delta Gyro_{0Y} & \delta Gyro_{0Z} \end{pmatrix}^T ;$$

$\delta North$; $\delta East$, $\delta Height$ – ошибки определения северной, восточной координаты и высоты местоположения БПЛА, м; δV_{North} , δV_{East} , δV_{Height} – ошибки определения северной, восточной и вертикальной проекции скорости БПЛА, м / сек; $\delta Roll$, δYaw , $\delta Pitch$ – ошибки определения угла крена, курса и тангажа БПЛА, рад; δAcc_{0X} , δAcc_{0Y} , δAcc_{0Z} – смещение нулевых сигналов акселерометров по осям OX, OY, OZ Связанной Системы Координат, м / сек²; $\delta Gyro_{0X}$, $\delta Gyro_{0Y}$, $\delta Gyro_{0Z}$ – смещение нулевого сигнала ДУС по оси OX, OY, OZ связанной системы координат, рад / сек; $F_{\text{ИНС}}$ – переходная матрица системы (15 x 15)

$$F_{\text{ИНС}} = \begin{pmatrix} 0_{3x3} & F_{\text{ИНС}1} & 0_{3x3} & 0_{3x3} & 0_{3x3} \\ 0_{3x3} & F_{\text{ИНС}2} & 0_{3x3} & F_{\text{ИНС}3} & 0_{3x3} \\ 0_{3x3} & 0_{3x3} & 0_{3x3} & 0_{3x3} & F_{\text{ИНС}4} \\ 0_{3x3} & 0_{3x3} & 0_{3x3} & 0_{3x3} & 0_{3x3} \\ 0_{3x3} & 0_{3x3} & 0_{3x3} & 0_{3x3} & 0_{3x3} \end{pmatrix} ;$$

$$F_{\text{ИНС}1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} ;$$

$$F_{\text{ИНС}2} = \begin{pmatrix} -\frac{\delta V_{\text{Height}}}{R_1} & -\frac{\delta V_{\text{North}}}{R_1} & -\frac{\delta V_{\text{East}} \operatorname{tg}(\varphi)}{R_2} - 2u \sin(\varphi) \\ -\frac{\delta V_{\text{North}} \operatorname{tg}(\varphi)}{R_2} & 0 & \frac{\delta V_{\text{East}}}{R_2} - 2u \cos(\varphi) \\ \frac{\delta V_{\text{East}} \operatorname{tg}(\varphi)}{R_2} + 2u \sin(\varphi) & 2u \cos(\varphi) & \frac{\delta V_{\text{North}}}{R_2} - \frac{\delta V_{\text{Height}}}{R_1} \end{pmatrix};$$

$$F_{\text{ИНС}3} = C;$$

$$F_{\text{ИНС}4} = C,$$

C – матрица перехода от Связанной Системы Координат к географическому сопровождающему трехграннику; R_1 – радиус кривизны меридионального сечения земного эллипсоида;

$$R_1 = a(1 - e^2)(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-3/2},$$

R_2 – радиус кривизны экваториального сечения земного эллипсоида:

$$R_2 = a(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1/2},$$

a – большая полуось земного эллипсоида (радиус земного экватора); b – малая полуось земного эллипсоида, м; e^2 – квадрат эксцентриситета земного эллипсоида; φ – широта местоположения БПЛА, рад; u – угловая скорость вращения Земли; dt – время дискретизации работы ИНС, сек; $w_{\text{ИНС}}$ – вектор формирующих белых шумов (6 x 1) с нулевым математическим ожиданием и единичной матрицей интенсивности;

$$w_{\text{ИНС}} = (w_{\delta a_x} w_{\delta a_y} w_{\delta a_z} w_{\delta \omega_x} w_{\delta \omega_y} w_{\delta \omega_z})^T;$$

$V_{\text{ИНС}}$ – матрица коэффициентов шумов (6 x 6);

$$V_{\text{ИНС}} = \begin{pmatrix} V_{\text{ИНС}1} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & V_{\text{ИНС}2} \end{pmatrix};$$

$$V_{\text{ИНС}1} = \begin{pmatrix} \sigma_{\delta a_x} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\delta a_y} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\delta a_z} \end{pmatrix};$$

$$V_{\text{ИНС}2} = \begin{pmatrix} \sigma_{\delta \omega_x} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\delta \omega_y} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\delta \omega_z} \end{pmatrix};$$

G – матрица шумов системы (15 x 6);

$$G = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{6 \times 3} \\ C & C \\ 0_{9 \times 3} & 0_{6 \times 3} \end{pmatrix}.$$

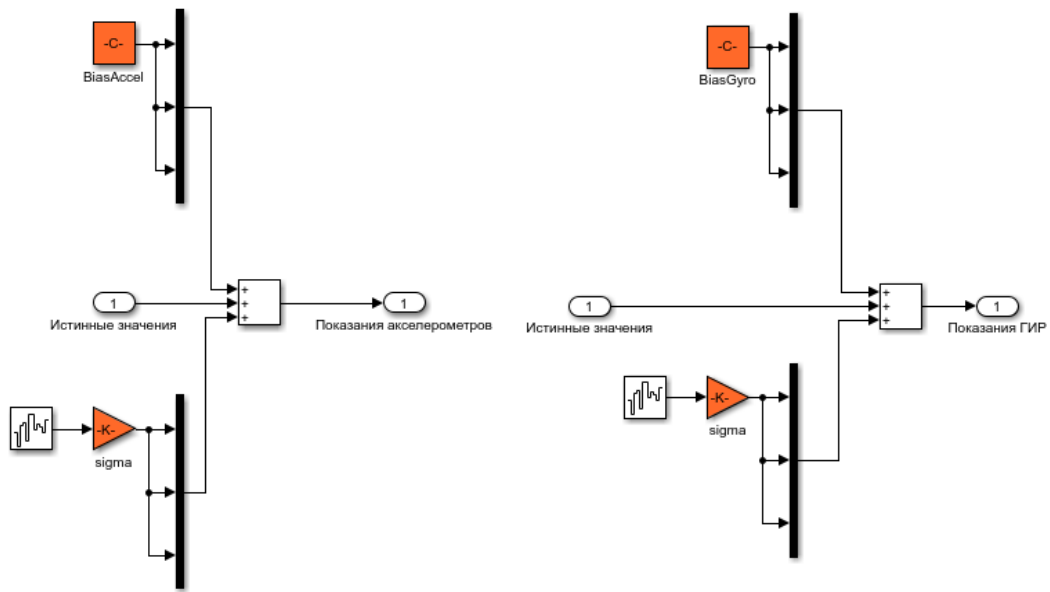


Рис. 1. Блоки моделей ошибок акселерометров и гироскопов

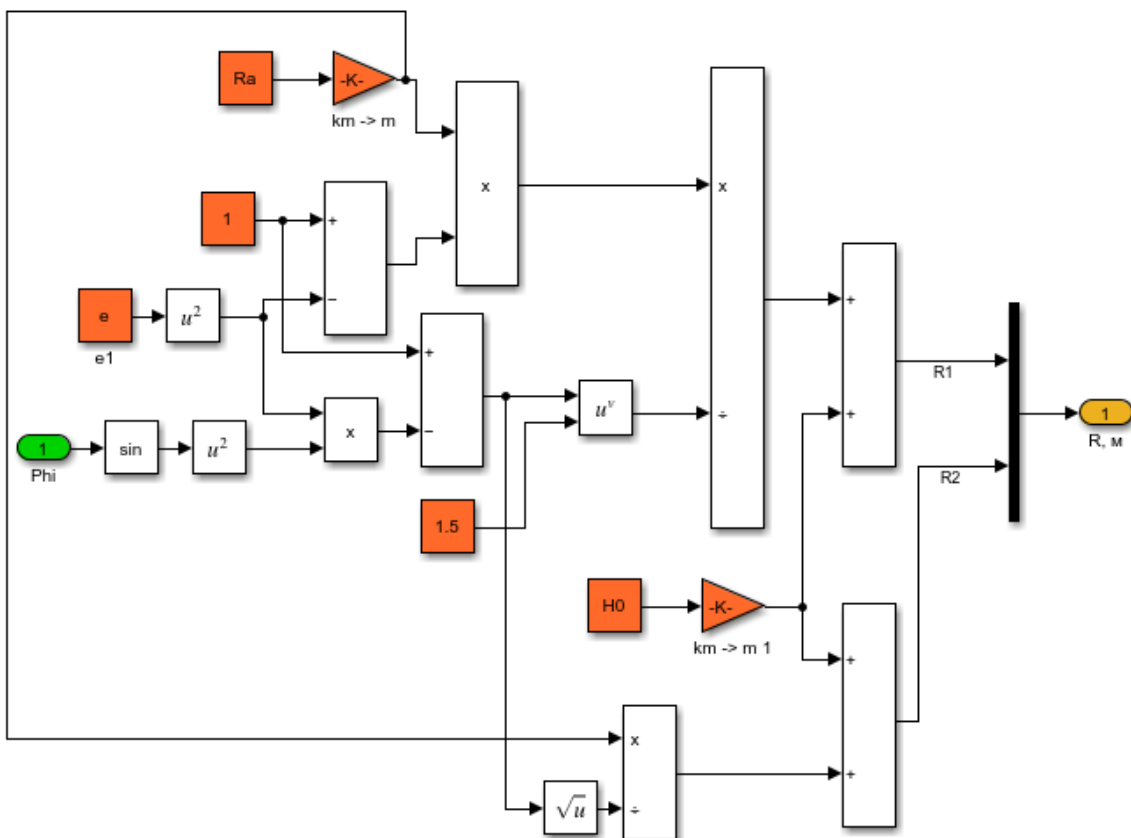


Рис. 2. Расчет радиус-вектора центра масс БПЛА

Углы ориентации БПЛА можно получить, решив уравнение Пуассона в кватернионной форме [2]

$$\frac{d\vec{\lambda}}{dt} = \frac{1}{2} \vec{\lambda} \circ \vec{W},$$

где $\vec{\lambda}$ – кватернион, соответствующей матрице направляющих косинусов:

$$\vec{\lambda} = (\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3),$$

\vec{W} – кватернион, составленный из проекций угловых скоростей:

$$\vec{W} = (0, w_X, w_Y, w_Z),$$

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_0 = \frac{1}{2}(-\lambda_1 w_X - \lambda_2 w_Y - \lambda_3 w_Z), \\ \dot{\lambda}_1 = \frac{1}{2}(\lambda_0 w_X - \lambda_3 w_Y + \lambda_2 w_Z), \\ \dot{\lambda}_2 = \frac{1}{2}(\lambda_3 w_X + \lambda_0 w_Y - \lambda_1 w_Z), \\ \dot{\lambda}_3 = \frac{1}{2}(-\lambda_2 w_X + \lambda_1 w_Y + \lambda_0 w_Z). \end{cases}$$

Углы ориентации вычисляются по следующим формулам:

$$\begin{cases} \vartheta = \arcsin(2\lambda_1^* \lambda_2^* + 2\lambda_0^* \lambda_3^*), \\ \gamma = \operatorname{atan} 2 \left(\frac{2\lambda_0^* \lambda_1^* - 2\lambda_2^* \lambda_3^*}{2\lambda_2^{2*} + 2\lambda_0^{2*} - 1} \right), \# \\ \psi = \operatorname{atan} 2 \left(\frac{2\lambda_0^* \lambda_2^* - 2\lambda_1^* \lambda_3^*}{2\lambda_2^{2*} + 2\lambda_0^{2*} - 1} \right), \end{cases}$$

где $\lambda^* = \frac{\lambda}{\|\lambda\|}$, $\|\lambda\|$ – норма кватерниона.

Расчет углов ориентации в среде MATLAB представлен на рис. 3.

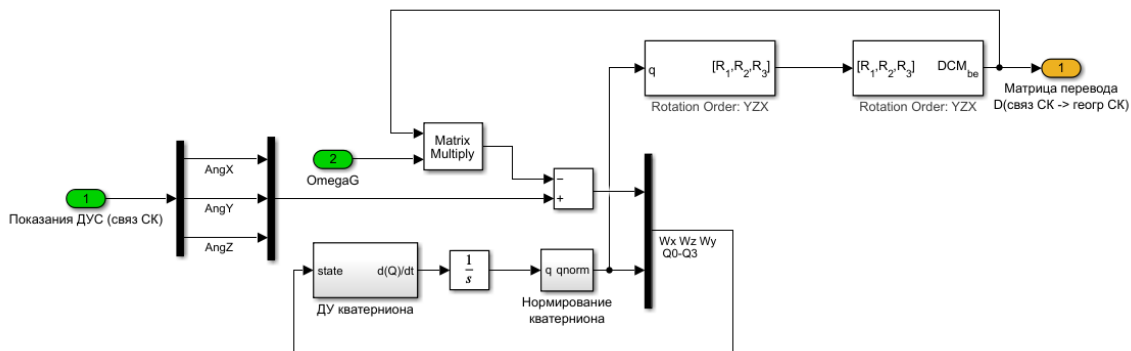


Рис. 3. Расчет углов ориентации в кватернионной форме

Переход от Связанной Системы Координат к географическому сопровождающему трехграннику осуществляется при помощи следующей матрицы:

$$C = \begin{pmatrix} \cos\vartheta\cos\Psi & -\cos\gamma\cos\Psi\sin\vartheta + \sin\gamma\sin\Psi & \sin\gamma\cos\Psi\sin\vartheta + \cos\gamma\sin\Psi \\ \sin\vartheta & \cos\gamma\cos\vartheta & -\sin\gamma\cos\vartheta \\ -\cos\vartheta\sin\Psi & \cos\gamma\sin\Psi\sin\vartheta + \sin\gamma\cos\Psi & -\sin\gamma\sin\Psi\sin\vartheta + \cos\gamma\cos\Psi \end{pmatrix}$$

где ϑ, γ, Ψ – углы тангажа, крена и курса БПЛА, рад

Общая модель алгоритма ориентации и навигации БПЛА в среде Matlab представлена на рис. 4.

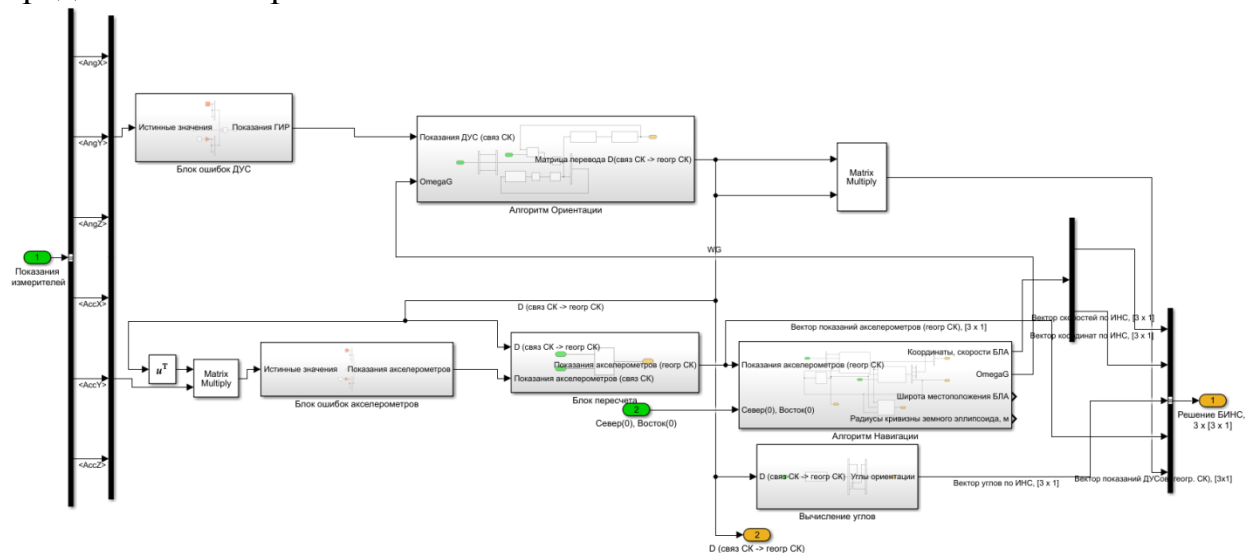


Рис. 4. Алгоритм ориентации и навигации БПЛА в среде MATLAB

Заключение. По результатам моделирования алгоритмов ориентации и навигации возможно проведение имитационного моделирования инерциальных навигационных систем. Разработанный алгоритм возможно апробировать на представленной ранее модели кинематики и динамики. Таким образом возможно имитационное моделирование поведения БПЛА при различных характеристиках бортового навигационного комплекса.

Библиографический список

1. Трефилов, П.М. Моделирование математической модели БПЛА мультироторного типа в среде Matlab / П.М. Трефилов, Г.К. Тевяшов // Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами». – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 503–514.
2. Красильщиков, М.Н. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / М.Н. Красильщиков, Г.Г. Серебряков. – М.: Физматлит, 2009. – 556 с.

РАЗРАБОТКА ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА СУТОЧНОГО ЦИКЛА УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА КАК СОЦИО- КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.А. Тутуров

С целью повышения функциональной устойчивости космического комплекса как социо-киберфизической системы разработана методика проектирования графического интерфейса суточного технологического цикла управления космическим аппаратом для повышения эффективности анализа динамики изменения состояния бортовой аппаратуры космического аппарата специалистами дежурной смены управления по данным бортовой телеметрии в процессе проведения сеанса связи с космическим аппаратом.

Ключевые слова: космический комплекс, функциональная устойчивость, социо-киберфизическая система, технологический цикл управления, графический интерфейс.

Повышение функциональной устойчивости космического комплекса – совокупности взаимосвязанных орбитальных и наземных технических средств, обеспечивающих решение различных задач на основе использования космического пространства [1] – является приоритетной целью с точки зрения оптимизации ресурсов и затрат на его эксплуатацию. Под функциональной устойчивостью предлагается понимать способность сохранения и/или восстановления функций рассматриваемой системы, а также адаптирования информационных каналов связи при изменении ее элементов под воздействием деструктивных факторов внешней и/или внутренней среды [2]. Из многочисленных элементов космического комплекса в данной работе рассматриваются только основные, а именно:

1) орбитальная группировка (ОГ) как совокупность космических аппаратов (КА), расположенных на орбитах в соответствии с баллистической структурой и объединенных общностью решаемых задач в составе космического комплекса [1];

2) наземный комплекс управления (НКУ) как совокупность технических средств и сооружений, предназначенных для управления функционированием ОГ КА с момента выведения на орбиту [1];

3) центр управления полетами (ЦУП) как сооружения с техническими системами и технологическими средствами командно-программного, телеметрического и баллистико-навигационного обеспечения, внешних информационных обменов, магистральных и специальных связей,

отображения, предназначенными для обеспечения деятельности обслуживающего персонала по формированию, передаче, приему, обработке, хранению, документированию информации при непрерывном процессе управления полетами КА в период их эксплуатации [1];

4) наземный комплекс приема, обработки и распределения информации (НКПОР) как совокупность взаимосвязанных наземных технических средств с программным обеспечением, предназначенных для обеспечения заказчика и его потребителей целевой информацией, полученной на основе космических данных [1].

Описание взаимодействий данных элементов космического комплекса традиционно осуществлялось посредством представления его в виде некой киберфизической системы (КФС) – интеллектуальной системы, основанной на инженерных взаимодействующих сетях физических и вычислительных компонентов [3]. Однако наряду с техническими и программными ресурсами, работу специалистов НКУ, НКПОР и ЦУП, в особенности дежурной смены управления КА, предлагается представить в виде социальных ресурсов, а сам космический комплекс – как социо-киберфизическую систему (СКФС) ввиду возросшей критичности влияния человеческого фактора на его функциональную устойчивость. Эффективность взаимодействия таких (кадровых) ресурсов с программными и техническими средствами предлагается оценивать с помощью расчета надежности некой системы поддержки принятия решений (СППР). В данной работе рассматривается лишь разработка методики проектирования графического интерфейса как основного элемента взаимодействия «человек-машина» для СППР.

Постановка задачи проектирования графического интерфейса для специалистов дежурной смены управления КА основана на пятилетнем опыте работы автора как специалиста в составе данной смены. Основная цель заключается в поиске пути совмещения показаний десятков датчиков бортовой аппаратуры КА в едином информационном пространстве. Необходимо обеспечить демонстрацию реализации всего текущего технологического цикла управления КА: все запланированные операции, текущее состояние КА, а также уже отработанные операции текущего цикла управления КА с наглядной демонстрацией отклонений реального состояния КА от ожидаемого согласно плану.

В качестве первого шага производится сбор всей доступной информации об объекте управления – КА и ресурсах системы управления объектом – космическом комплексе. Информационная модель космического комплекса представлена на рисунке 1. Вся информация распределяется по трем осям, отражающим ресурсы космического комплекса как СКФС: кадры, программы и техника.

Под кадрами понимается текущая возможность эффективного задействования в цикле управления КА опыта, знаний и интуиции специалистов НКУ, ЦУП и НКПОР, которая прямо выражается фактическим присутствием на рабочем месте экспертов, а косвенно в производственной и справочной документации, ежедневно применяемой и уточняемой специалистами дежурной смены управления КА. При штатных условиях работы кадровые ресурсы положительны за счет суточного характера работы дежурной смены. Падение уровня кадровых ресурсов возможно, как за счет уменьшения количества персонала, так и за счет снижения его эффективности вследствие событий природного, техногенного и социального характеров или снижения квалификации ввиду ротации кадрового состава.

Под программами понимаются возможность эффективного задействования совокупности бортового и наземного программных обеспечений (ПО), а также и нормативной документации планирования текущего технологического цикла управления КА, определяющей границы автоматической работы данного ПО. Падение уровня программных ресурсов зачастую обусловлено накоплением ошибок ПО.

Под техникой понимается возможность эффективного задействования совокупность технических ресурсов космического комплекса. Падение уровня технических ресурсов происходит посредством старения техники, что зачастую остро проявляется в условиях воздействия неблагоприятных внешних и/или внутренних факторов среды.

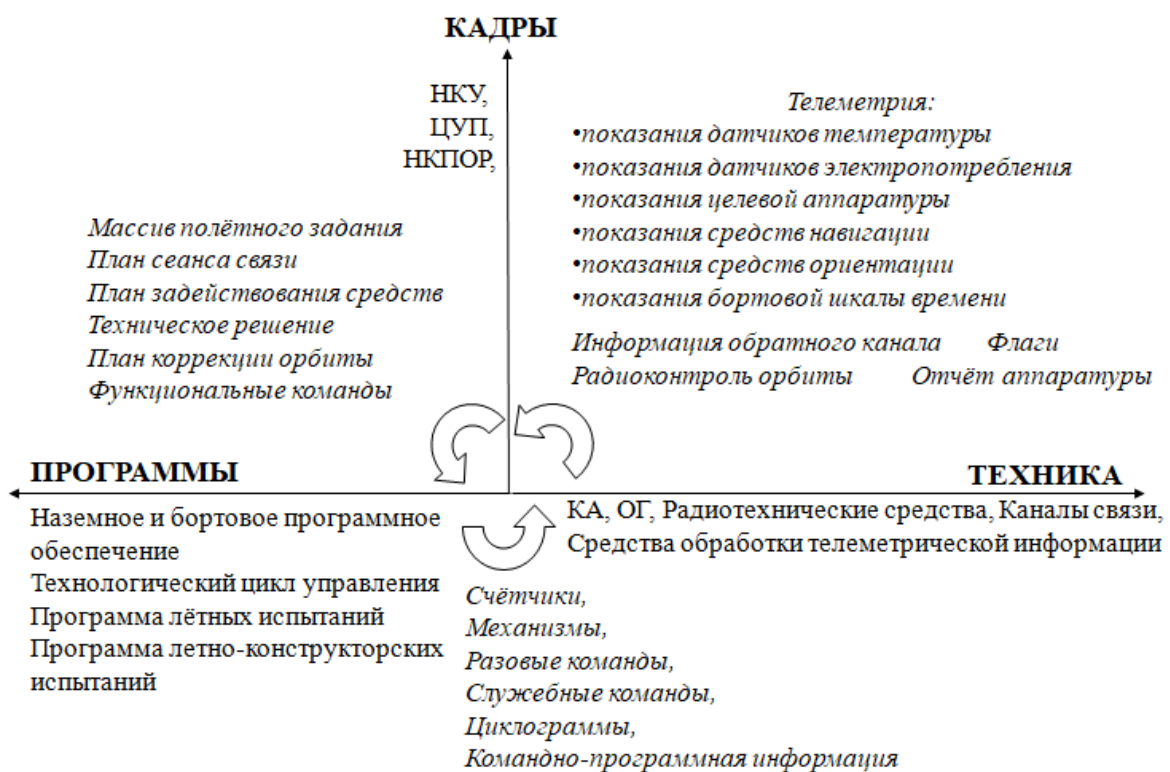


Рис. 1. Информационная модель космического комплекса

Кадровые, программные и технические ресурсы соответственно имеют шесть видов взаимодействий – три «чистых» и три «смешанных»:

- 1) кадровые процессы;
- 2) программные процессы;
- 3) технические процессы;
- 4) кадрово-технические (К-Т) процессы;
- 5) технико-программные (Т-П) процессы;
- 6) программно-кадровые (П-К) процессы.

«Чистые» процессы отображают взаимодействия кадров, программ и техники в собственных границах под воздействием негативных факторов внешней и/или внутренней среды. Таким образом, «чистые» процессы носят случайный характер, отражая непредвиденные взаимодействия элементов, аварии, отказы, конфликты и ошибки. Примеры этих взаимодействий для каждой категории были даны выше.

Технико-программные процессы отображают взаимодействие программного обеспечения и техники автономно, без участия человека, направленные на реализацию полетных заданий для автоматических контуров управления. Т-П процессы составляют основу деятельности космического аппарата и перемежаются с П-К и К-Т процессами только во время проведения сеанса связи.

Программно-кадровые процессы отображают взаимодействие кадров с программным обеспечением – наземным и бортовым, в рамках планирования полетного задания, а также между кадрами и коллективами посредством нормативных документов, инструкций и программ деятельности. По-сути, подавляющее большинство действий внутри коллективов относятся к П-К процессам, а оставшаяся часть – к чистым кадровым процессам.

Кадрово-технические процессы отображают взаимодействие коллективов с техникой напрямую посредством диагностики телеметрии космического аппарата и характеристик наземной техники: каналов связи, наземных радиотехнических средств и средств обработки телеметрической информации. Любое взаимодействие человека с техникой относится к К-Т процессам, однако критическую важность они приобретают непосредственно во время сеанса связи с космическим аппаратом.

Таким образом, «Смешанные» взаимодействия строго определены эксплуатационной документацией, примеры их основных категорий представлены на рисунке 1 курсивом в соответственных областях между осями. Именно «Смешанные» взаимодействия станут основной информацией, отображаемой на графическом интерфейсе суточного цикла управления КА.

Прототип графического интерфейса суточного цикла управления КА представлен на рисунке 2. Рассмотрим представленные на рисунке 2 семь областей не по порядку, а исходя из логики данного повествования.

Область №5 (голубой цвет) – область плановых программно-кадровых процессов. Вертикальные пики отображают времена и продолжительность проведения сеансов связи с КА. Поскольку пользователями данного интерфейса предполагаются специалисты дежурной смены управления КА, интенсивность их работы показана равномерной с падением на сон большинства сотрудников от 2 ночи до 5 часов утра. Разумеется, в реальности интенсивность даже запланированных действий будет изменяться, что даст дополнительные результаты при исследовании вопросов оптимизации трудовой деятельности. Следует обратить внимание, что серым пунктиром без заливки голубым цветом показаны незапланированные сеансы связи с КА, но возможные для проведения исходя из взаимодействия баллистических параметров орбиты КА с географией наземных станций связи НКУ.

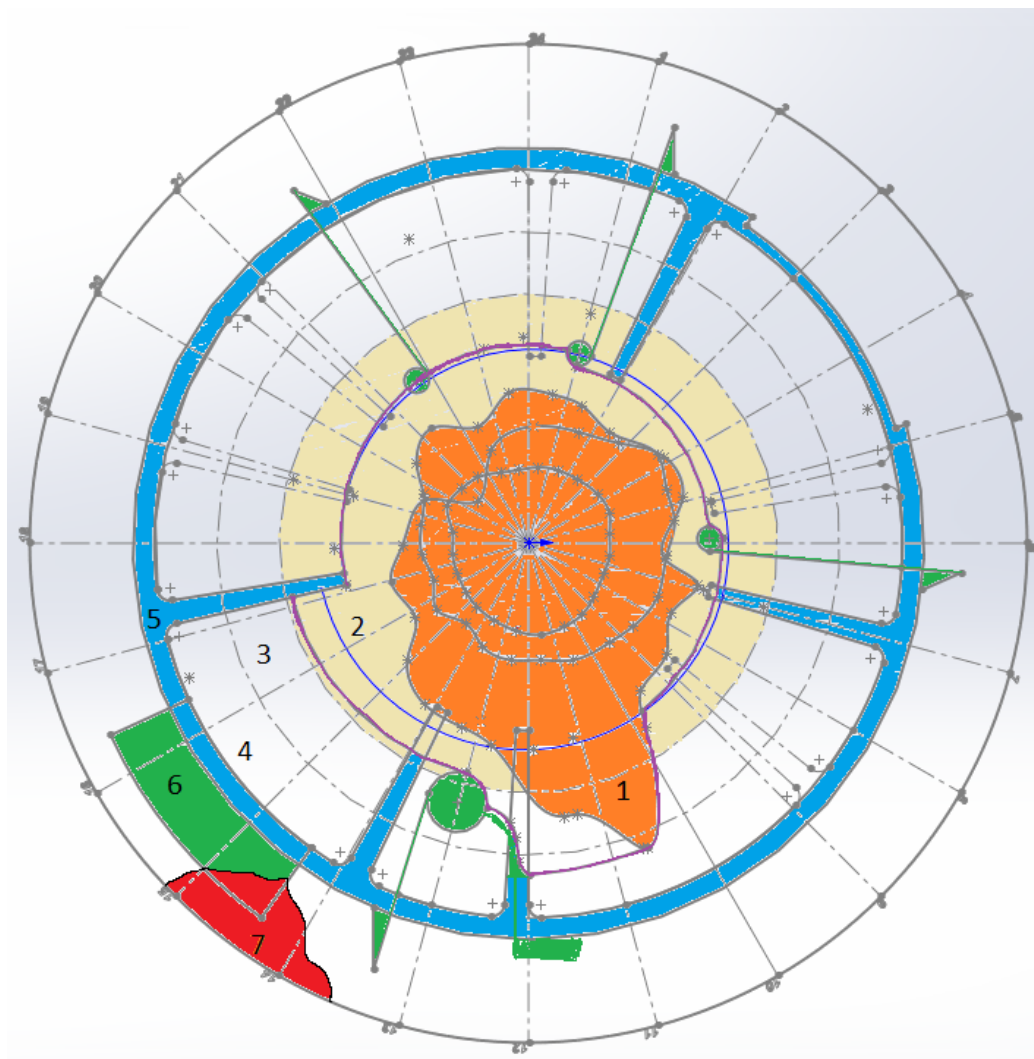


Рис. 2. Прототип графического интерфейса суточного цикла управления КА

Область №6 (зеленый цвет) – область технико-программных процессов. Эта область неоднородна и лежит в обеих средах: на Земле и в космосе. Крупный прямоугольный участок зеленого цвета (между 14 и 17 часами) с внешней стороны от области № 5 отображает максимальную загруженность наземного ПО ЦУП и НКПОР в связи с подготовкой новой рабочей программы на следующие сутки полета КА, которая штатно закладывается на первом вечернем «закладочном» сеансе связи с КА. Треугольные зеленые участки (около 1, 6, 13 и 22 часов) отображают обработку наземным ПО запланированных автоматических сбросов отчетов о работе целевой аппаратуры КА по радиоканалу связи на пункты приема НКПОР. Круглые зеленые участки, соединенные с зелеными треугольными, являются отображением работы бортового ПО в рамках рабочей программы на текущие сутки полета КА.

Области №1 и №7 – это области нештатных ситуаций в космосе и на Земле соответственно. В случае области №1, ее состав в большинстве случаев представлен ошибками в «чистых» программных и технических процессах. Например, ошибки в бортовом ПО или попадание микрометеоритов в элементы конструкций или приборов КА. В случае области №7, к ошибкам в наземном ПО и технике добавляются ошибки, обусловленные прямым влиянием человеческого фактора, в то время как для области №1 они могут существовать лишь косвенно с момента разработки и проектирования КА и его бортового ПО.

Области №2, №3 и №4 соответственно отображают зоны «штатного», «ограниченного» и «нештатного» функционирования КА в космосе. Внешняя граница области №4 соответствует физическому прекращению работоспособности КА ввиду полной потери функциональной устойчивости или штатной консервации с последующей утилизацией после окончания срока эксплуатации.

Кадрово-технические взаимодействия на рисунке 2 отображены прямо в моменты проведения сеансов связи с КА и косвенно «вектором состояния КА» представленном спиралью синего цвета в области №2 и фиолетовой кривой в областях №2, №3 и №4. Оба «вектора состояния КА» берут начало на вечернем «закладочном» витке и отражают поведение аппарата соответственно синий – предполагаемое, а фиолетовый – реальное на основании обработки и анализа данных бортовой телеметрии КА. Как видно на рисунке 2, выполнения рабочей программы (зеленые круги) могут как не оказывать влияния на «вектор состояния КА», так и отклонять его от запланированного положения (синий цвет) как в сторону большей устойчивости (к центру), так и в сторону меньшей устойчивости (к краю области №2).

Следует отметить, что, хотя граница области №1 имеет случайный характер, внутри данной области находятся определяемые контуры трех ограничений, являющихся следствиями «чистых» процессов, а именно:

1) ограничения, обусловленные несовершенством ПО, как правило, максимальны на этапе летных испытаний КА и должны устраняться к их окончанию;

2) ограничения, обусловленные старением бортового оборудования и конструкций КА. Данные ограничения, как правило, неустранимы ввиду невозможности или не рентабельности проведения ремонта и/или замены вышедших из строя элементов в условиях космоса. Данные ограничения постепенно расширяют область №1, и по факту являются основной причиной прекращения эксплуатации КА.

3) ограничения, обусловленные изменениями эксплуатационной документации на основе принятия решений экспертным сообществом по итогам анализа нештатных ситуаций на борту КА.

Заключение. Представленная модель графического интерфейса суточного цикла управления КА для космического комплекса как СКФС еще далека от завершения, сложность вызывает реализация «вектора состояния КА», однако работа в данном направлении продолжается. В перспективе данный графически интерфейс должен стать частью системы поддержки принятия решений на основе дифференциальных нейронных сетей, обрабатывающих данные бортовой телеметрии.

Библиографический список

1. ГОСТ 53802-2010. Станции и комплексы космические. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2019. – 5 с.
2. Королев, А.Н. Функциональная устойчивость навигационно-информационных систем / А.Н. Королев // Известия высших учебных заведений. – 2018. – Т. 61, № 7. – С. 559–56.
3. ПНСТ 416-2020. Система киберфизическая. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2020.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЯ СУММАРНОГО ЭКОЛОГО- ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Л.И. Филинков, А.М. Лихтер

Обеспечивать работу теплогенерирующей установки на предприятиях энергетики с учетом не только экономических, но и экологических норм – важная производственная задача. Системы автоматического управления котлоагрегатами контролируют параметры процесса в допустимом диапазоне характеристик. Энергетический котел является сложным объектом регулирования, поэтому в помощь оператору котельной (лицу, принимающему решения – ЛПР) предложена система поддержки принятия решения (далее – СППР).

Эксперимент. На Ульяновской ТЭЦ-1 в январе 2021 года был проведен эксперимент по снятию основных технологических параметров котлоагрегата №1. Этими параметрами были: расход природного газа, содержание кислорода в дымовых газах, содержание оксидов азота в дымовых газах, паропроизводительность, температура дымовых газов t_{yx} за водяным экономайзером. Фиксация данных происходила в автоматическом режиме каждые 60 секунд в течение рабочего дня. Данные архивировались в формат xls. Таблица состоит из двух тысяч строк. Фрагмент данных приведен табл. 1.

Таблица 1

Фрагмент значений параметров, снятых в ходе эксперимента

Дата	Расход газа	Содержание NOx в уходящих газах	Содержание O2 в уходящих газах, слева, корпус А	Расход пара за котлом	Температура уходящих дымовых газов, T _{yx}
	Куб.м./час	%	%	т/ч	гр.С
10/01/21 0:00	35170.01	84.86	1.73	449.866	321.1
10/01/21 0:01	35169.17	84.93	1.63	448.367	321.2
10/01/21 0:02	35168.33	85.01	1.71	448.367	321.2
10/01/21 0:03	35167.49	85.09	1.68	449.06	321.3
10/01/21 0:04	35166.65	85.17	1.67	444.107	321.4

Некоторые из снятых зависимостей представлены на рис.1 и 2. Из нее следует, что КПД котлоагрегата линейно падает при повышении содержания кислорода в дымовых газах. Отсюда следует вывод, что экономически выгодно удерживать содержание кислорода в дымовых газах на минимальных значениях. Однако снижение кислорода в дымовых газах может привести к повышению токсичности выбросов. Отсюда встает актуальный вопрос поиска оптимального значения содержания кислорода в дымовых газах.

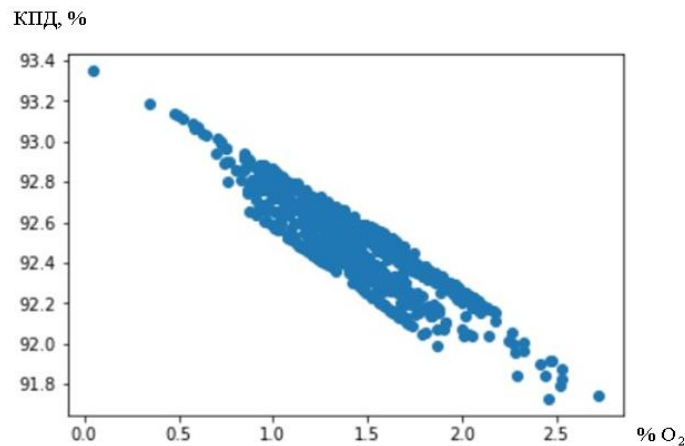


Рис 1. Зависимость КПД от содержания кислорода в дымовых газах

В связи с этим выглядит актуальным вопрос о разработке СППР. Исходя из приведенного выше графика можно предложить, чтобы при превышении концентрации кислорода выше 4% ЛПР получил сообщение на экран монитора: «Содержание кислорода в дымовых газах превышено», а также можно сформировать базу знаний по корректному регулированию того или иного параметра работы котлоагрегата. Фрагмент базы знаний предложен в табл. 2.

Зависимость концентрации оксидов азота в дымовых газах от паропроизводительности. Рис. 2 свидетельствует о явно прослеживаемой зависимости концентрации оксидов азота от паропроизводительности. Это обусловлено тем, что увеличивается теплонапряжение в топке, способствующее более активному протеканию процесса связывания азота с кислородом и образованию тепловых оксидов азота. При превышении концентрации выше 100 мг/куб.м. [1] дымовых газов менеджер получает сообщение «Концентрация оксидов азота превышена» и соответствующую данному сообщению выдержку из базы знаний, направленную на принятие менеджером корректного решения. Между тем, общеизвестен способ снижения тепловых оксидов азота за счет снижения удельной тепловой нагрузки топки котлоагрегата [2].

Фрагмент базы знаний о возможных причинах и способах устранения превышений параметров

Контролируемый параметр	Отклонение параметра от нормального режима	Возможные причины превышения	Действие оператора по устранению нарушения
Концентрация оксидов азота в дымовых газах	Превышение	<ol style="list-style-type: none"> 1. Велико значение кислорода в дымовых газах 2. Расход природного газа на котел выше расчетного 3. Превышено теплонапряжение топки котлоагрегата 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Увеличить расход воздуха на котел 2. Снизить расход природного газа 3. Снизить расход природного газа

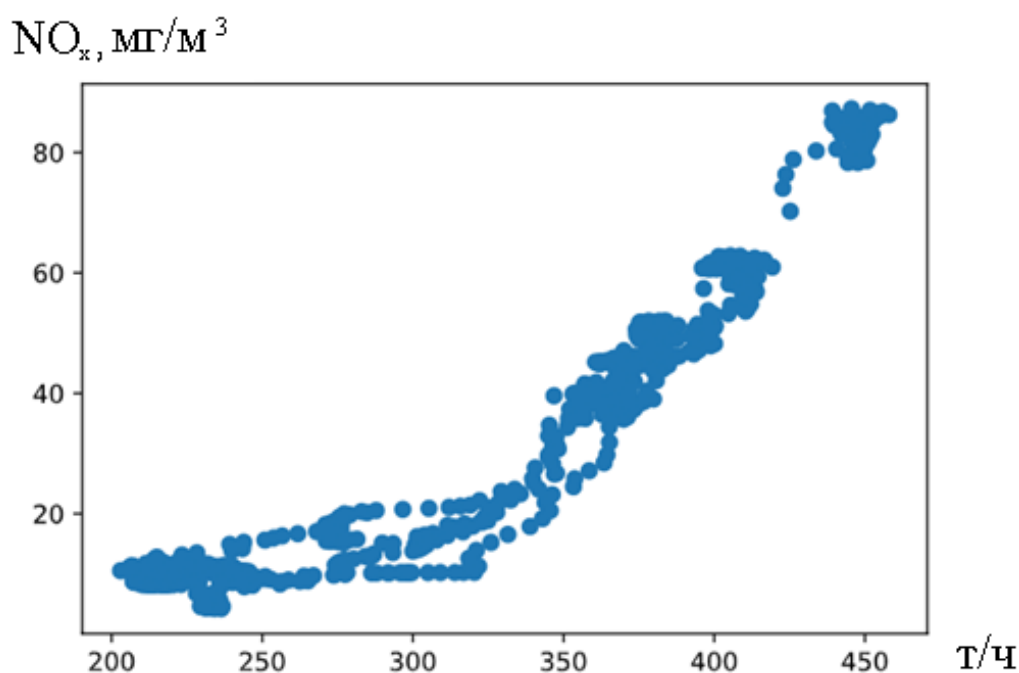


Рис. 2. Зависимость КПД от содержания кислорода в дымовых газах

Из графиков можно проследить связь между технологическими и экологическими параметрами. Эти зависимости могут лечь в основу для построения СППР. Как было сказано выше, для ЛПР наиболее интересно перейти к экономическому параметру и регулировать технологический процесс исходя из условия минимизации платы за выбросы.

Полный перечень вредных веществ и ставок платы за выбросы в атмосферный воздух стационарными источниками приведен в Постановлении Правительства [3].

Между тем, работа котлоагрегата должна удовлетворять ряду требований, в том числе обязательных. Эти требования должны быть учтены в предлагаемой СППР.

Для СППР необходимо определить набор входных данных. К этим данным можно применить ряд требований, которые можно классифицировать и ранжировать.

I. Ограничения и требования, которые *обязательны* к исполнению в соответствии с нормативными документами.

НТД регламентируют содержание угарного газа в дымовых газах не более 119 мкг/куб.м. [4].

Согласно утвержденным 01.03.2021 г. Санитарным Правилам и Нормам СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», предельно допустимая концентрация диоксида азота NO₂ (концентрация, обеспечивающая допустимые (приемлемые) уровни риска при воздействии не менее 24 часов – среднесуточная) составляет 0,1 мг/м³.

Количество часов наработки котлоагрегатом в год также может быть ограничено ввиду наличия ремонтных периодов.

II. Требования и ограничения, определяемые их важностью с точки зрения экспертов – организаторов процесса горения.

Например, операторы знают о техническом состоянии шиберов на воздуховодах, и могут экспертно оценить, каким образом можно на конкретном котлоагрегате наиболее эффективным образом увеличить расход воздуха – с помощью дымососа или же с помощью дутьевого вентилятора. Приведем другой пример применения данного требования. Оператор может, что определенный котел по каким-либо технологическим причинам нельзя использовать на максимальную мощность, тогда этот котел лучше не использовать для покрытия пиковых нагрузок, а покрывать им лишь базовую нагрузку. Таким образом, с помощью экспертов можно проранжировать варианты реализации какого-либо параметра или действия.

III. Требования, повышающие экономическую эффективность.

Пример: максимизировать величину КПД котельной.

Формализация: $\sum_{n=1}^{N_{\text{дн}}} \sum_{p=R_{\text{коп}}(n-1)+1}^{R_{\text{коп}}(n)-1} \eta \cdot \rightarrow \max$, где $N_{\text{дн}}$ – число котлов в котельной; $R_{\text{коп}}(n)$ – число котлоагрегатов, задействованных работу для покрытия тепловой нагрузки котельной в n-ый день $1 \leq n \leq N_{\text{дн}}$.

IV. Требования и ограничения рекомендательного характера.

Пример: метеорологические требования. Общеизвестно, что при определенных метеоусловиях (штиль, туман) загрязнение атмосферы от котельных наносит максимально неблагоприятного воздействие на здоровье людей, находящихся недалеко от котельной. Эти условия легко формализуются с помощью нечеткой логики [1]. Формирование базы

правил системы нечеткого вывода осуществляется в виде упорядоченного непротиворечивого списка нечетких продукционных правил вида «ЕСЛИ А, ТО В», где в роли параметра А служит скорость ветра, наличие тумана и т.п. Параметр А получаем с помощью API запроса с сайта <https://openweathermap.org/>. На выходе из данного блока требований имеем рекомендацию о возможности/невозможности дальнейшей работы котельной без снижения мощности.

V. Требования и ограничения метрологического характера.

Авторами [5] была создана нейронная сеть, способная оперативно выявить наличие в системе автоматизации датчиков, вышедших из строя. Нейросеть обучается на обучающей выборке параметров конкретного котлоагрегата, исходя из условия, что все датчики откалиброваны и работают корректно. Затем в процессе эксплуатации нейросеть вырабатывает подсказки о неисправности того или иного датчика. На эту нейросеть получен патент. Выходной сигнал с нейросети также является ограничением для системы поддержки принятия решений.

Значение 0 соответствует выходу нейронной сети, соответствующему корректности работы всех датчиков.

Разработка критерия. Как было сказано выше, для ЛПП наиболее интересно перейти к экономическому параметру и регулировать технологический процесс исходя из условия минимизации платы за выбросы.

Для этого предлагаем ввести критерий «Суммарная эколого-экономическая нагрузка объекта генерации», который предлагаем определять по следующей формуле:

$$F = \sum_{i=1}^n T_i * \frac{c_j * V_{\text{сг}} * V_p}{\text{ПДК}_{\text{ср.сут.}}},$$

где F – суммарная эколого-экономическая нагрузка объекта генерации (в усл.ед.); T_i – тариф на выброс загрязняющего вещества, тыс.руб./т.; c_j – массовая концентрация загрязняющего вещества j в сухих дымовых газах, мг/нм³; измеряемая с помощью стационарных приборов; $V_{\text{сг}}$ – объем сухих дымовых газов, образующихся при полном сгорании 1 кг (1нм³) топлива, при $\alpha_0 = 1,4$ нм³/кг топлива (нм³/нм³ топлива); V_p – расчетный расход топлива; при определении выбросов в граммах в секунду V_p берется в т/ч (тыс.нм³/ч); при определении выбросов в тоннах в год V_p берется т/год (тыс.нм³/год); $\text{ПДК}_{\text{ср.сут.}}$ – предельно допустимая концентрация загрязняющего i-го вещества (мг/м³) за принятый промежуток времени.

На рис. 3 приведена графическая зависимость суммарной эколого-экономической нагрузки объекта генерации от паропроизводительности.

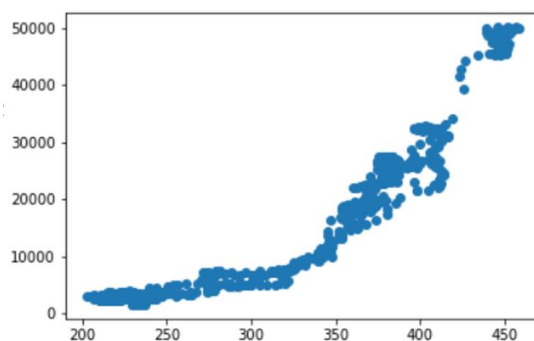


Рис. 3. Суммарная эколого-экономическая характеристика объекта генерации в зависимости от паропроизводительности

Средствами MS Excel было найдено аппроксимирующее уравнение множества точек, которое имеет вид: $y = 0,0005 \cdot x^3 + 0,4807 \cdot x^2 - 300,1 \cdot x + 40347$, при этом среднеквадратичная ошибка составляет $R^2 = 0,9746$.

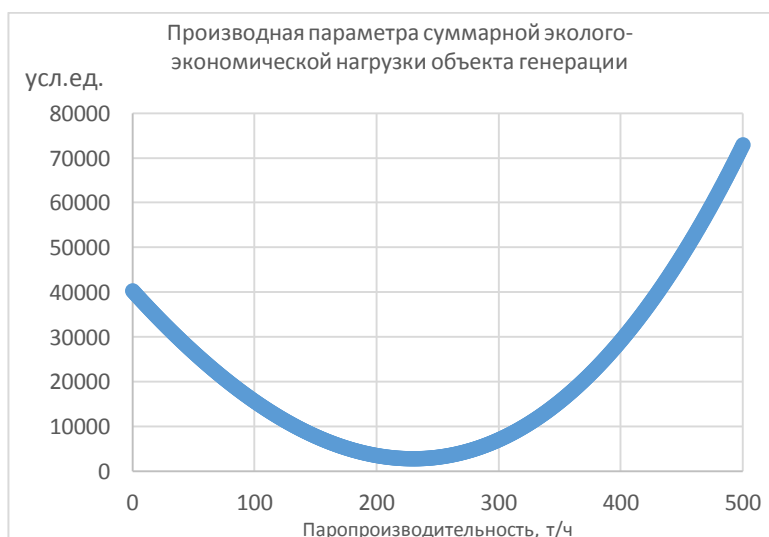


Рис. 4. Производная эколого-экономической характеристики объекта генерации в зависимости от паропроизводительности

Анализ рис. 4 показывает, что по критерию суммарной эколого-экономической характеристики наиболее выгодным выглядит режим работы котлоагрегата при паропроизводительности 250 т/ч, что соответствует режиму работы на 50% от номинальной нагрузки.

Заключение. Существующие методики оценки экологического воздействия имеют ряд недостатков, которые делают применение расчетных параметров неудобными в СППР. В статье предложено понятие «Суммарная эколого-экономическая нагрузка объекта генерации», которое удобным образом вмещает в себя как экологические, так и экономические характеристики процесса сжигания топлива. Данное понятие применимо

для любого типа топлива и критерий минимизации данного параметра может лечь в основу выбора наиболее успешного варианта реализации СППР. Приведен анализ значений данного критерия применительно к действующему котлоагрегату и сделан вывод о наиболее предпочтительном интервале паропроизводительности.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование
2. Таймаров М.А., Ахметова Р.В., Сунгатуллин Р.Г., Чикляев Д.Е., Чикляев Е.Г. // Проблемы энергетики. – 2016. – № 9-10. – С. 83–90.
3. Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 N 913 (ред. от 24.01.2020) «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах».
4. ГОСТ Р 51733-2001
5. Л.И. Филинков, А.М. Лихтер, Кокуев А.Г., Денисов Д.В., Глебов В.В. Выявление сбоев датчиков на основе эколого-экономических параметров работы котельной с использованием нейросети // Вестник астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2022-2-14-21>

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА В ЗАДАЧЕ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ РАСХОДА ГАЗА В ЗОНАХ ПЕЧИ ОТ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОКАТНОГО СТАНА

А.В. Фомин, П.И. Жуков

Статья посвящена вопросам разработки функциональной модели межконтурных взаимодействий внутри печи нагрева металла перед прокаткой. В рамках работы изучается влияние производительности стана на суммарный расход газа (тепловая мощность, подаваемая на печь). Приведены результаты регрессионного анализа зависимости производительность-расход, показаны причины низкого качества регрессии. Осуществлен переход от производительности печи к среднему времени нахождения заготовок в зонах печи. Получена регрессионная модель с коэффициентом детерминации 0,917.

Металлургический комплекс является энергоемким производством, потребляя значительное количество ресурсов и топлива. Одним из неотъемлемых этапов в производстве металлопродукции, эффективность которого напрямую определяет стоимость готового продукта, является обработка металла в нагревательных печах. В частности, они являются одними из основных потребителей энергии в составе цеха проката металла. Поэтому решение задачи энергосбережения при нагреве металла перед прокаткой является перспективной и актуальной проблемой.

Современные исследования по повышению энергоэффективности печей нагрева металла можно условно разделить на несколько направлений:

Большое количество работ направлено на построение математических моделей тепловых процессов [1–5], происходящих внутри печей нагрева, и получение на основании них кривых нагрева металла. Однако, несмотря на постоянное совершенствование и усложнение получаемых моделей, ключевым недостатком математического подхода является значительная сложность многозонных печей нагрева и, как результат, трудность формализации процессов, которые протекают внутри нее.

Исследования влияния различных конструкций горелочных устройств, тепловых режимов, рекуперации энергии: применение скоростных, рекуперативных горелок, переход на импульсный режим отопления [6–9]. Однако, подобные решения сопряжены с технической модернизацией печей, значительными изменениями режимов и технологии нагрева.

Управление печами на производстве ведется на основе стандартной схемы с обратной связью по выходу объекта управления. Для каждой зоны создается контур управления температурой, а задания для таких контуров,

во многих случаях, устанавливает оператор технологического процесса, руководствуясь технологической инструкцией и марочником металла. Таким образом, для управления печью нагрева, как и для подавляющего большинства объектов управления в промышленности, используется ПИД-алгоритм управления.

При этом локальные контура оказывают друг на друга значительное влияние в виде возмущающих воздействий, которые никак не учитываются локальными регуляторами. Отсутствие учета данных связей приводит к снижению эффективности как регулирования, так и работы печи в целом. Целью является учет межконтурных взаимодействий различной технологической природы, что оказывают существенное влияние на ход процесса, усложняя задачу управления. В данной работе предлагается решить частную подзадачу сформулированной выше проблемы: изучить влияние внешнего внепечного фактора в виде производительности (темпа прокатки) на внутривспечные процессы

В качестве объекта исследования в работе выступает печь нагрева металла перед прокатом сортовых заготовок. Пространство проходных нагревательных печей разделено на зоны (рис. 1): подогрева (состоит из расположенных одна над другой зон №1 и №2), зона нагрева (зоны №3 и №4) и выравнивания (зоны №5 и №6) с разными по видам и мощности горелками. Основные технологические требования по качеству управления сводятся к поддержанию температур в зонах печи в заданном по технологической карте нагрева диапазоне. Регулирование температуры в зонах печи осуществляется классическим ПИД-контуром управления с применением адаптации в виде таблицы переключений параметров [10].

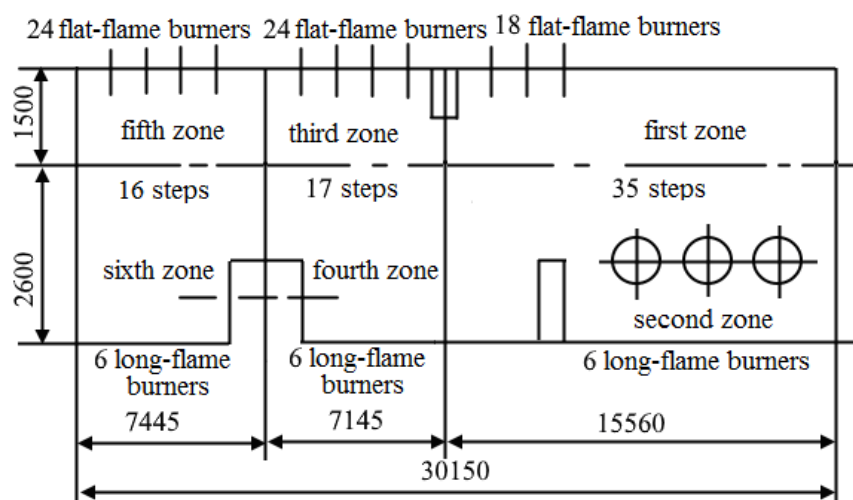


Рис. 1. Схема зон печи нагрева металла

В рамках данного исследования ведется изучение внепечных факторов.

Предположение 1. Пусть имеется зависимость неизвестного рода между темпом проката (почасовой производительностью печи) и суммарной потребляемой тепловой мощностью печи, которая выражается общим расходом газа.

Опираясь на данное предположение, была выдвинута гипотеза, что искомая зависимость явная и нелинейная. Для проверки гипотезы использовались данные по непосредственному расходу газа и почасовой производительности печи. Вся информация была получена из действующей системы управления и представлена на рис. 2.

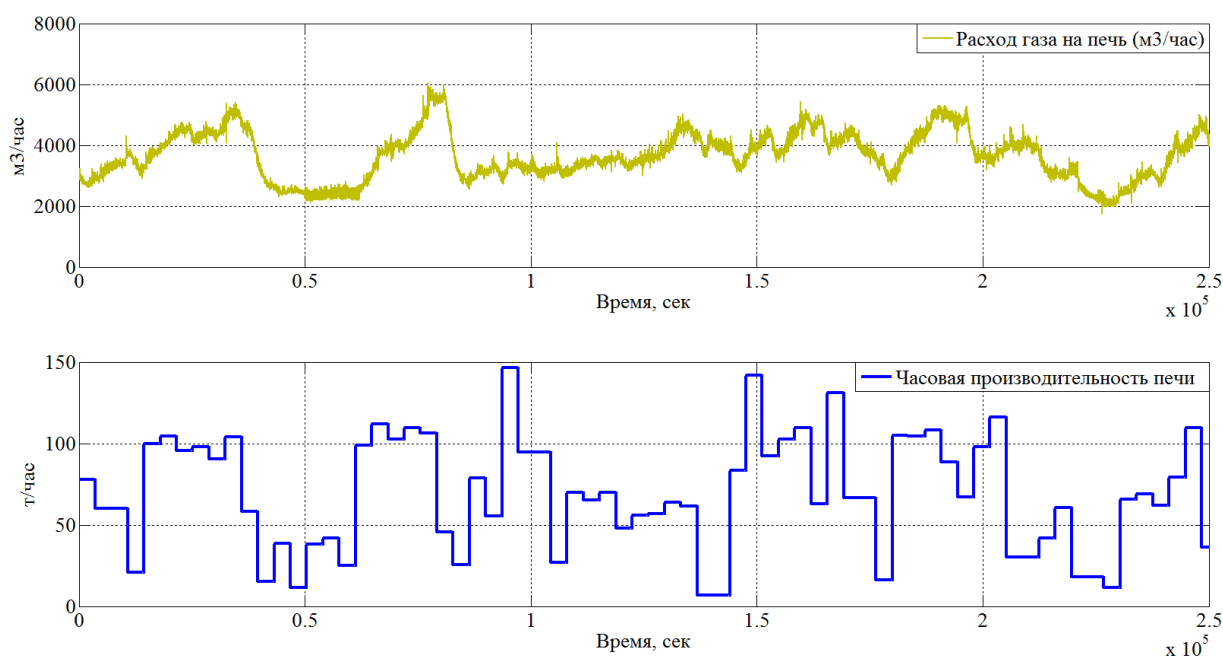


Рис. 2. Схема зон печи нагрева металла

Известно, что параметр «расход газа» измеряемый, а «производительность» – оцениваемый и в определенном смысле является расчетным на основании ряда субъективных параметров. Кроме того, временной ряд параметра «почасовая производительность» не является непрерывным и получен путем синтетического приращения дискретных замеров с частотой раз в час. Такой временной ряд будет обладать избыточным количеством незначущих нулей, что не позволяет использовать его для дальнейшего анализа.

Одновременно с этим, из рисунка 2 можно заметить, что взаимосвязь между мощностью и производительностью все-таки имеется. Проведя более детальный анализ, было установлено, что производительность влияет на мощность с непостоянным лагом (запаздыванием), при этом наблюдается закономерность между временем высокой или низкой производительности и мощностью.

В результате, была выдвинута вторая гипотеза о том, что производительность влияет на мощность не по значению, а по времени воздействия. Данная гипотеза имеет технологическую интерпретацию – значительное изменение темпа наступает после перевалки на стане (замены валков для проката другого профиля металла). За время перевалки (порядка 2030 минут) металл в печи успевает прогреться и снижает потребление тепла. Следует отметить, что температуры в зонах печи не одинаковы: в зонах подогрева №12 (методические зоны) уставки по температуре находятся в пределах [950;1000°С], в сварочных зонах №34 – [1180;1240°С] (в зависимости от марочника нагреваемых сталей), в зонах выдержки №56 (томильные зоны) – [1170;1220°С].

Пусть производительность в момент времени t описывается функцией следующего вида:

$$f(t) = \sum_{i=1}^k \frac{m_i}{x_i}, \quad (1)$$

где m_i – масса i -й заготовки в печи, x_i – время нахождения i -й заготовки в печи, k – возможное количество заготовок в печи. Для рассматриваемой печи в рабочем пространстве не может быть больше 68 заготовок.

Движение заготовок через печь смещает их индекс ($m_i \rightarrow m_{i+1}$, $x_i \rightarrow x_{i+1}$), при этом общая масса металла в печи при каждом смещении будет иметь вид:

$$\begin{cases} M_{\text{пред.}} = \sum_{i=1}^k m_i \\ M = M_{\text{пред.}} - m_k + m_1 \end{cases} \quad (2)$$

где $M_{\text{пред.}}$ – это масса общей садки в печи до шага, M – масса общей садки в печи после шага. Для общего времени в печи наблюдается иная зависимость:

$$\begin{cases} X_{\text{пред.}} = \sum_{i=1}^k x_i \\ X = X_{\text{пред.}} - x_k + 0 \end{cases} \quad (3)$$

где $X_{\text{пред.}}$ – суммарное время нахождения всех заготовок в печи перед шагом, X – суммарное время нахождения заготовок в печи после шага. Как можно заметить из (3), суммарное время нахождения заготовок в печи ничем не компенсируется при «шаге печи» кроме собственных значений x_i .

Таким образом, вышеизложенное можно интерпретировать следующим образом: чем чаще шаги, тем меньше суммарное время заготовок в печи (3) и тем выше производительность, согласно (1).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k}. \quad (4)$$

Варьируя параметр $1 < k < 68$, можно оценить среднее время, которое заготовки провели в печи по отдельным ее зонам. (пара зон №12 занимает места с 1 по 35, вторая пара зон №34 с 36 по 52, третья пара зон №5/6 с 53 по 68 место).

Используя регрессионный анализ, была получена зависимость между суммарным расходом и общим средним временем нахождения заготовок в печи:

$$F(\bar{x}) = 8462 \cdot e^{-0.004\bar{x}}, \quad (5)$$

где $F(\bar{x})$ – суммарный расход газа на печь, м³/ч; \bar{x} – среднее времени заготовок в печи, минуты. Коэффициент детерминации составил порядка 0.913.

Целью дальнейших исследований является переход от общепечного расхода к расходам позонно с перспективой привязки данных параметров к коэффициенту усиления зоны нагрева.

Заключение. Проведено исследование по поиску зависимости между производительностью и расходом газа на печь, в результате получена регрессионная модель на основе зависимости расхода газа от среднего времени нахождения заготовок с качеством регрессии 0,913. Полученные результаты позволяют в дальнейшем перейти от всепечной зависимости к зависимостям позонно.

Библиографический список

1. Гинкул С.И., Бирюков А.Б., Иванова А.А., Гнитиев П.А. Прогнозная математическая модель процесса нагрева металла в печах с шагающими балками // *Металлург.* – 2018. – № 1. – С. 24–28.
2. Бирюков А.Б., Иванова А.А. Диагностика температурного состояния металла при его тепловой обработке в печах непрерывного действия // *Металлург.* – 2018. – № 4. – С. 33–37.
3. Андреев С. М. Прогнозирование времени нагрева заготовок в условиях нестационарного режима работы методических печей // *Электротехнические системы и комплексы.* – 2017. – №. 3 (36). – С. 35-40.
4. Жуков П. И., Глущенко А. И., Фомин А. В. Модель для прогнозирования температуры заготовки по ретроспекции ее нагрева на основе бустинга структуры «случайный лес» // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии.* – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 11–27.
5. Бирюков А. Б., Иванова А. А. Управление процессом тепловой обработки металла в печи с помощью системы диагностики теплосодержания садки // *Металлург.* – 2019. – №. 8. – С. 54-58.
6. Вохмяков А. М., Казяев М. Д., Казяев Д. М. Исследование конвективного теплообмена в проходной печи, оснащенной скоростными горелками // *Цветные металлы.* – 2011. – №. 12. – С. 89-93.
7. Бирюков А. Б. Анализ мероприятий по повышению значения коэффициента использования топлива при нагреве металла в печах // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.* – 2013. – №. 10 (116). – С. 31–37.

8. Бирюков А. Б. Исследование зависимости конструктивных параметров теплообменных насадок регенеративных горелок от теплотехнических условий протекания процесса // Сталь. – 2021. – №. 4. – С. 65–69.

9. Парсункин Б. Н., Самарина И. Г. Система автоматического энергосберегающего управления на основе математической модели газодинамического режима нагревательной методической печи // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. – №. 2 (35). – С. 55–60.

10. Чернов К.А., Фомин А.В., Глущенко А.И. Адаптивное управление технологическими агрегатами АО "ОЭМК им. А.А. Угарова" на основе нейросетевой настройки параметров регуляторов // Metallurg. – 2022. – № 1. – С. 70-78. – DOI 10.52351/00260827_2022_01_70.

ПРИМЕНЕНИЕ ГАРАНТИРОВАННОГО ПОДХОДА В ЗАДАЧЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОСТОЯННОМУ ТОКУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ

Д.В. Хаданович

Рассматривается задача гарантированного оценивания величины сопротивления постоянному току обмоток трансформаторов в условиях параметрической неопределенности помех в измерениях. Наряду с оцениванием полезного сигнала (сопротивления) решается задача идентификации, направленная на определение параметров модели помех. Гарантированный подход оперирует с множествами возможных значений параметров, при этом зависимость измерений от оцениваемых параметров нелинейная. Результатом разрабатываемого алгоритма оценивания является сеточно-аналитическая процедура построения множеств, основанная на методах интервального анализа.

Ключевые слова: гарантированный подход, оценивание параметров, нелинейная модель измерений, информационное множество, интервальный анализ.

Измерение активного сопротивления обмоток – один из наиболее распространенных методов диагностики силовых трансформаторов. Измеренные значения сопротивлений обмоток оцениваются по результатам сравнения с паспортными данными. Измерением сопротивления постоянному току обмоток трансформаторов выявляют такие дефекты, как нарушение пайки, некачественный контакт в местах соединений выводов обмоток к выводам трансформатора и др.

Способ измерения сопротивления постоянному току обмоток трансформаторов [1] заключается в том, что через последовательно соединенные обмотку и эталонный резистор пропускают постоянный стабилизированный ток. Во время нарастания тока в обмотке до заданного значения выполняют измерения тока и падения напряжения на обмотке и эталонном резисторе, и вычисляют их отношение, на основе которого получают оценку искомого сопротивления.

При измерении сопротивления постоянному току обмотки низкого напряжения трансформатора ТМ-1000 измерительный ток оказался недостаточным для насыщения магнитопровода, что обусловило длительное установление сопротивления исследуемой обмотки. С ростом времени установления сопротивления возрастает риск не распознать развивающийся дефект, потому как результаты измерений тока и напряжения могут быть искажены из-за нагрева. Уменьшение

длительности этапа установления сопротивления и повышение точности измерений возможны за счет применения алгоритмов фильтрации, сочетающих методы обработки измерительной информации с методами оценивания неизвестных параметров [2, 3], определяющих свойства полезного сигнала и помех в измерениях.

Рассматривается задача обработки экспериментальных данных – выборки результатов измерений напряжения u_k на обмотке трансформатора. Математически динамику измерений можно описать моделью

$$u_k = IR + Ae^{-\alpha k} + \eta_k, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где I – постоянный измерительный ток известной величины, R – искомое сопротивление обмотки, параметры A ($A > 0, const$) и α ($\alpha > 0, const$) экспоненциальной составляющей измерений подлежат оцениванию, помехи η_k неизвестны, но для них задан диапазон их возможных значений

$$\eta_k \in H = [-\eta, +\eta]. \quad (2)$$

Обработка измерений (1) может осуществляться методами идентификации и фильтрации путем сведения модели (1) к форме модели в пространстве параметров

$$\left. \begin{aligned} x_k &= x_{k-1}, \\ u_k &= \varphi(x_k, k) + \eta_k, \quad k = 1, \dots, N, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $x_k \in R^3$ – вектор неизвестных параметров, $\varphi(x_k, k) = Ix_1 + x_2e^{-x_3k}$.

В рамках гарантированного подхода можно сформулировать задачу построения множества \bar{X}_k (информационного множества) возможных значений вектора параметров x_k [4–8]

$$x_k \in \bar{X}_k = \bar{X}_{k-1} \cap \{x \mid \varphi(x_k, k) = u_k - \eta, \eta \in H\}, \quad k = 1, \dots, N, \quad (4)$$

при этом предполагается, что начальный вектор параметров x_0 известен с точностью до заданного множества X_0 : $x_0 \in X_0 = \bar{X}_0$.

Информационное множество (4), получаемое в результате решения нелинейной задачи оценивания, может оказаться невыпуклым и несвязным [9–11]. Задача гарантированного оценивания в этом случае заключается в аппроксимации множеств, получаемых в результате нелинейных преобразований [12]. Такая аппроксимация является внешней оценкой, и, в общем случае, может оказаться очень грубой [13–16].

Основной особенностью задачи, исследуемой в данной работе, являются нелинейная зависимость измерений от оцениваемых параметров и отсутствие априорной информации о части координат вектора параметров. В этих условиях требуется построить множество \bar{X}_k возможных значений параметров, совместное с результатами измерений

u_k при ограничении на величину ошибки измерений η_k (2). Предлагаемый в данной работе подход к решению задачи оценивания основан на последовательном выделении экспоненциальной и постоянной составляющих измерений u_k (1).

В условиях отсутствия априорной информации о части координат вектора параметров x_k в (3) и малого числа доступных измерений, получить оценки параметров экспоненциальной составляющей измерений u_k (1) можно путем формирования временной последовательности разностей измерений

$$z_k = f(x, k) + v_k, \quad v_k \in V = [-v, +v], \quad k = 2, \dots, N, \quad (5)$$

где $z_k \equiv u_k - u_{k-1}$, $v_k \equiv \eta_k - \eta_{k-1}$, $x \in R^2$ – вектор неизвестных параметров, $x_1 \equiv \alpha$, $x_2 \equiv A$, $f(x, k) = x_2 e^{-x_1 k} (1 - e^{x_1})$.

С учетом ограничения (5) на помехи v_k , найдем систему нелинейных неравенств, описывающую последовательность множеств $X[z_k]$, $k = \overline{2, N}$, совместимых с измерениями (z_k , $k = 2, \dots, N$)

$$x \in X[z_N] = \begin{cases} z_2 - +v \leq f(x, 2) \leq z_2 - -v, \\ \dots \\ z_N - +v \leq f(x, N) \leq z_N - -v. \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) описывает невыпуклое множество в пространстве параметров (α, A) , и таким образом неявно описывает множество возможных значений параметров в момент времени N . Задача оценивания заключается в решении системы (6) относительно оцениваемого вектора x . Пусть X^* – множество всех решений $x = (\alpha, A)$ системы (6). Однако, в силу нелинейности, точную характеристику множества решений X^* получить невозможно [18]. Поэтому рассмотрим построение множеств $X[z_k]$, $k = \overline{2, N}$, с помощью математического аппарата, используемого в методах интервального анализа [17].

Априорная информация о переменной x_1 вектора x и помехах v_k в (5) представлена в виде множественных (интервальных) оценок [19]

$$x_1 \in X_1 = [-x_1, +x_1], \quad v_k \in V = [-v, +v], \quad k = \overline{2, N}. \quad (7)$$

Возможные (допустимые) значения переменной x_2 вектора x могут быть вычислены из (5)

$$x_2 = \left((z_k - v_k) e^{x_1 k} \right) / (1 - e^{x_1}), \quad k = 2, \dots, N.$$

Тогда с учетом интервальных ограничений переменной x_1 и помех v_k (7) можно указать следующий алгоритм построения множеств $X[z_k]$, $k = \overline{2, N}$.

1. На интервале значений переменной $x_1 \in X_1 = [-x_1, +x_1]$ вводится сетка $\{x_{1j}, j = \overline{1, M}\}$ с достаточно малым шагом.

2. Для каждого узла x_{1j} строится интервал неопределенности значений переменной x_2 с соответствующими границами

$$X_{2j} = \left[(z_k - v), (z_k + v) \right] \frac{e^{x_{1j}k}}{1 - e^{x_{1j}}}, \quad \forall j = \overline{1, M}, k = \overline{2, \dots, N}. \quad (8)$$

3. При зафиксированном значении x_{1j} возьмем пару интервалов X_{2i} и X_{2j} (8), $i < j$, и построим множество $G_{ij}(x)$ возможных значений параметров x_1 и x_2 для этой пары интервалов. На плоскости параметров точки, соответствующие концам интервалов X_{2i} и X_{2j} , ограничивают выпуклое множество $G_{ij}(x)$ параметров, совместимое с парой интервалов неопределенности X_{2i} и X_{2j} . Объединение двух множеств $G_{ij}(x)$ и $G_{ml}(x)$ позволяет выделить множество параметров, совместимое уже с четверкой интервалов неопределенности X_{2i} , X_{2j} , X_{2m} и X_{2l} (рис. 1). Объединение всех множеств $G_{ij}(x)$, $i = \overline{1, M-1}$, $j = i+1, M$, образует множество $X[z_k]$

$$X[z_k] = \bigcup_{\substack{i=\overline{1, M-1}, \\ j=i+1, M}} G_{ij}(x), \quad k = \overline{2, \dots, N}. \quad (9)$$

Искомое информационное множество \bar{X}_k параметров может быть получено по рекуррентным соотношениям

$$\bar{X}_k = \bar{X}_{k-1} \cap X[z_k], \quad k = \overline{3, N}, \quad \bar{X}_k = X[z_k], \quad k = 2. \quad (10)$$

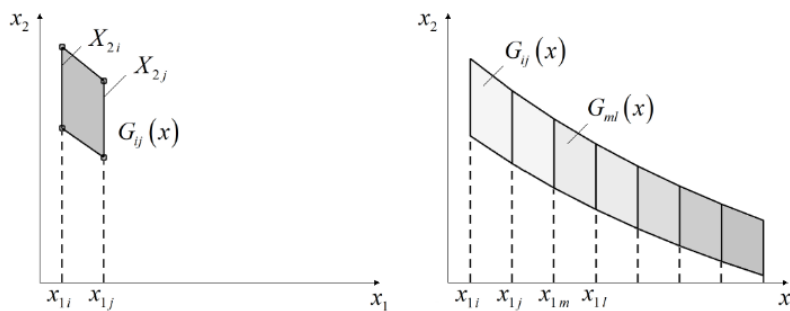


Рис. 1. Построение множества $G_{ij}(x)$ возможных значений параметров $x_1 \equiv \alpha$ и $x_2 \equiv A$, совместимого с парой интервалов неопределенности X_{2i} и X_{2j}

Необходимо отметить, что представление множества $X[z_k]$ (9) в виде объединения выпуклых множеств позволяет точно строить в явном виде множество, которое в силу нелинейности измерений z_k не является выпуклым. Выпуклость множеств $G_{ij}(x)$ позволяет использовать быстрые процедуры для реализации операций объединения и пересечения множеств в реальном времени и обеспечивает быстрое действие вычислительных программ. Искомое информационное множество вектора параметров (α, A) представлено в явном виде с точным описанием его опорных точек.

Выделение экспоненциальной составляющей наблюдаемого процесса представляет собой аппроксимацию измерений u_k экспоненциальной функцией

$$u_k = \hat{A}e^{-\hat{\alpha}k} + \delta_k, \quad k = 2, \dots, N, \quad (11)$$

где $\hat{\alpha}, \hat{A}$ – точечные оценки параметров α и A соответственно, δ_k – ошибка аппроксимации.

Для вектора параметров $x = (\alpha, A)^T$ получена последовательность информационных множеств $x \in \bar{X}_k, k = \overline{2, N}$ (11). Информационное множество на каждом шаге k задано конечным набором опорных точек. Для каждой точки множества известны ее координаты. Ошибка аппроксимации δ_k в (11) может быть вычислена с точностью до интервала, границы которого определяются следующим образом

$$\delta_k \in \Lambda_k = \left[\min \{u_k - f(x_{ik}, k)\}_{i=1}^m, \max \{u_k - f(x_{ik}, k)\}_{i=1}^m \right], \quad k = 2, \dots, N, \quad (12)$$

где $x_{ik} = (x_{ik}^1, x_{ik}^2)^T$ – i -ая точка множества \bar{X}_k (11), $f(x_{ik}, k) = x_{ik}^2 e^{-x_{ik}^1 k}$, операции $\min\{\cdot\}$ и $\max\{\cdot\}$ поиска нижней и верхней границы интервала выполняются варьированием параметров (α, A) из соответствующего информационного множества \bar{X}_k [17].

Ошибка аппроксимации δ_k представляет собой «аддитивную смесь» искомого сопротивления R обмотки и помехи η_k :

$$\delta_k = IR + \eta_k, \quad k = 2, \dots, N. \quad (13)$$

Величина тока I известна, величины δ_k и η_k известны с точностью до интервалов: $\delta_k \in \Lambda_k$ (12) и $\eta_k \in H$ (2) соответственно. Следовательно,

сопротивление R обмотки может быть вычислено с точностью до интервала его возможных значений

$$R \in \bar{R}_k = (\Lambda_k - H) / I, \quad k = 2, \dots, N, \quad (14)$$

Числитель в (14) – интервал, определяемый в результате операции вычитания интервальной арифметики [20].

Интервал возможных значений сопротивления для последовательности измерений u_2, \dots, u_N может быть определен в соответствии с

$$R_N \in \bigcap_{k=2}^N \bar{R}_k. \quad (15)$$

Таким образом, рассматриваемая трехмерная задача (3) сведена к двум подзадачам меньшей размерности: оценивание вектора параметров $x \in R^2$ экспоненциальной составляющей измерений u_k и оценивание величины $x \in R$ постоянной составляющей измерений u_k . При этом оценивание неизвестной константы в (1) осуществляется по результатам оценивания параметров экспоненты. Такая декомпозиция задачи позволяет реализовать алгоритм оценивания более быстрый и точный по сравнению с широко используемыми подходами на основе эллипсоидов и параллелотопов [9, 12–16]. В [19] был реализован алгоритм оценивания величины сопротивления R трансформатора по результатам зашумленных измерений (1). Моделирование проводилось в среде MATLAB. По результатам обработки измерений $\{z_k\}_{k=2}^N$ были получены следующие оценки параметров (рис. 2)

$$\alpha \in [0,087, 0,108], \quad A \in [0,9627, 1,0913].$$

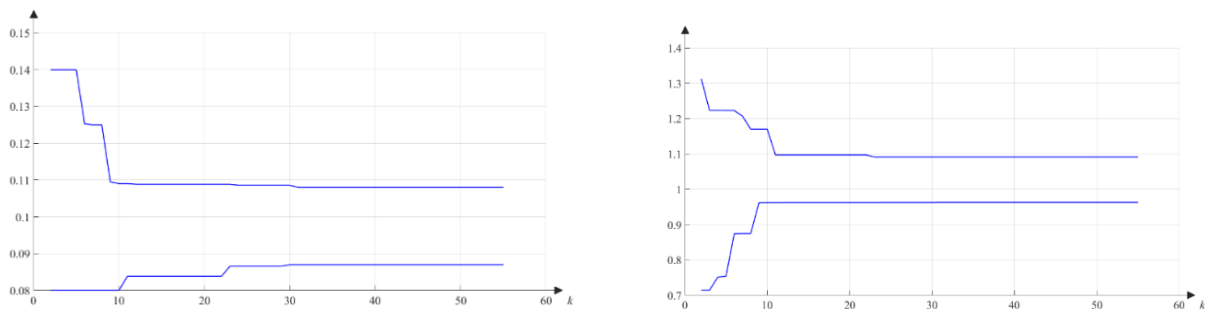


Рис. 2. Интервальные оценки параметров (проекция информационного множества на соответствующие координатные оси),
а) интервальная оценка параметра α б) интервальная оценка параметра A

На указанном графике видно, что начиная с шага $k = 30$ оценивание вектора параметров $x = (\alpha, A)^T$ практически прекратилось: $x \in \bar{X}_k = \bar{X}_{k-1}$. Обработка последовательности z_k , $k > 30$, не несет дополнительной информации, т.е. на шаге $k = 30$ достигнута предельная точность

алгоритма. Это объясняется тем, что точность гарантированного алгоритма оценивания зависит от реализации помех v_k внутри заданного интервала $[-v, +v]$. Уточнение множественных оценок удается в случае, когда реализующиеся помехи оказываются близки к границам заданного интервала [19].

Было проведено сравнение времени k попадания оценки сопротивления в диапазон погрешности, равный $\pm 2\%$ от номинального значения $R=1$ Ом, т.е. в диапазон от 0,98 Ом до 1,02 Ом. В отсутствие алгоритмов обработки измерительной информации время попадания величины сопротивления в указанный диапазон определяется окончанием переходного процесса, и составляет $k=41$. Верхняя граница интервальной оценки сопротивления, полученная с применением гарантированного алгоритма, попала в область допустимой погрешности на шаге $k=27$, время получения диапазона возможных значений сопротивления обмотки удалось уменьшить почти в два раза.

Заключение. При решении задачи гарантированного оценивания параметров модели динамических измерений могут возникать сложности, связанные с нелинейной зависимостью измерений от оцениваемых параметров. Информационное множество параметров, получаемое в результате решения нелинейной задачи, может быть невыпуклым и/или неограниченным.

Предложенный в работе алгоритм оценивания основан на декомпозиции задачи. Такой подход позволяет получать оценки в отсутствие априорной информации о части оцениваемых параметрах. Сеточно-аналитическая процедура построения множеств позволяет использовать быстрые процедуры для реализации операций объединения и пересечения множеств в реальном времени. Предложенный алгоритм гарантированного оценивания параметров модели динамических измерений имеет ряд преимуществ:

- реализация алгоритма не требует выдвигать предположений о статистических характеристиках помех;
- алгоритм рекуррентный и может быть реализован в темпе поступления данных измерений;
- алгоритм гарантирует принадлежность неизвестных параметров полученным множествам.

Библиографический список

1. Патент 2696365 Российская Федерация. Способ измерения сопротивления постоянному току / Г.И. Волович. – № 2018128134; заявл. 01.08.18; опубл. 01.08.19, Бюл. № 22. – 10 с.

2. Андриевский, Б.Р. Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Часть 1. Методы / Б.Р. Андриевский, И.Б. Фуртат // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 9. – С. 3–61.
3. Андриевский, Б.Р. Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Часть 2. Приложения / Б.Р. Андриевский, И.Б. Фуртат // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 10. – С. 35–91.
4. Schweppe, F.C. Recursive State Estimation: Unknown but Bounded Errors and System Inputs / F.C. Schweppe // IEEE Trans. Autom. Control. – 1968. – Vol. 13, No. 1. – P. 22–28.
5. Bertsekas, D.P. Recursive State Estimation for a Set-Membership Description of Uncertainty / D.P. Bertsekas, I.B. Rhodes // IEEE Trans. Autom. Control. – 1971. – Vol. 16, No. 2. – P. 117–128.
6. Lychak, M.M. Multiple Approach to Identification and Estimation of Controlled Objects State / M.M. Lychak // J. Autom. Inf. Sci. – 1999. – Vol. 31, No. 11. – P. 25–30.
7. Kuntsevich, V.M. Guaranteed Estimates, Adaptation and Robustnes in Control Systems / V.M. Kuntsevich, M.M. Lychak. – Berlin: Springer-Verlag. – 1992.
8. Blanchini, F. Set-Theoretic Methods in Control / F. Blanchini, S. Miani. – Birkhauser. – 2015.
9. Куржанский, А.Б. Идентификация нелинейных процессов – гарантированные оценки / А.Б. Куржанский, В.Д. Фурасов // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 6. – С. 70–87.
10. Raissi, T. Set membership state and parameter estimation for systems described by nonlinear differential equations / T. Raissi, N. Ramdani, Y. Candau // Automatica. – 2004. – Vol. 40, No. 10. – P. 1771–1777.
11. Bo Zhou A New Nonlinear Set Membership Filter Based on Guaranteed Bounding Ellipsoid Algorithm / Bo Zhou, Kun Qian, Xu-Dong Ma, Xian-Zhong Dai // Acta Automatica Sinica. – 2013. – Vol. 39, No. 2. – P. 146–154.
12. Сальников, Н.Н. Эллипсоидальное оценивание состояний и параметров динамической системы при отсутствии априорной информации / Н.Н. Сальников // Проблемы управления и информатики. – 2014. – № 2. – С. 144–156.
13. Черноусько, Ф.Л. Гарантированные оценки неопределенных величин при помощи эллипсоидов / Ф.Л. Черноусько // Докл. АН СССР. – 1980. – Т. 251, № 1. – С. 51–54.
14. Филимонов, Н.Б. Идентификация состояния и внешней среды дискретных динамических объектов методом полиэдрального программирования / Н.Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 2. – С. 11–15.
15. Alamo, T. Guaranteed state estimation by zonotopes / T. Alamo, J. M. Bravo, E. F. Camacho // Automatica. – 2005. – Vol. 41, No. 6. – P. 1035–1043.
16. Polyak, B.T. Estimation of Parameters in Linear Multidimensional Systems under Interval Uncertainty / B.T. Polyak, S.A. Nazin // J. Autom. Inf. Sci. – 2006. – Vol. 38, No. 2. – P. 19–33.
17. Кумков, С.И. Сравнение методов интервального анализа и стандартных статистических методов в задаче оценивания экспериментальных данных с

неопределенностью / С.И. Кумков, Л. Жолен // Измерительная техника. – 2019. – № 2. – С. 13–17.

18. Paulen, R. Guaranteed parameter estimation in nonlinear dynamic systems using improved bounding techniques / R. Paulen, M. Villanueva, M. Fikar, B. Chachuat // European Control Conference (ECC). – 2013. – P. 4514–4519.

19. Khadanovich, D.V. Guaranteed Estimation in the Problem of Transformer Windings DC Resistance Measuring / D.V. Khadanovich // Proceedings – SUMMA 2021. – 2021. – DOI: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632036.

20. Шарый, С.П. Конечномерный интервальный анализ. [Электрон. книга] / С.П. Шарый. – URL: <http://www.nsc.ru/interval/Library/InteBooks>.

ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППОЙ РОБОТОВ С ЦЕЛЬЮ ПОСАДКИ БПЛА НА ФОРМИРУЕМУЮ КОРПУСАМИ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ ПЛАТФОРМУ

А.С. Широков

В работе рассматривалась задача формирования управления образованием наземными роботами платформы для посадки на нее БПЛА. Приведены введенные при решении задачи ограничения и полученные результаты. Обозначены дальнейшие планы проведения исследований по указанной теме.

Ключевые слова: роботы, формация, групповое управление.

Усилия многих исследовательских коллективов и индивидуальных ученых в области робототехники направлены на построение автономных коллективов роботов различного назначения и на решение связанных с этой целью задач. Одним из перспективных направлений развития групповой робототехники является взаимодействие роботов разных сред, в частности воздушной и наземной. Такое взаимодействие оказывается эффективным, поскольку может расширить функциональные возможности решаемой задачи

и оптимизировать процесс ее выполнения. Например, при применении совместно с наземными роботами беспилотные летательные аппараты (БПЛА) могут оказать помощь в навигации наземной части группы с помощью построения карты местности [1, 2], а наземные роботы могут выступать в качестве платформы для посадки БПЛА с возможностью дальнейшего обслуживания или транспортировки [3, 4].

Исследования показывают, что уже существуют готовые решения по посадке БПЛА на наземные мобильные средства, однако существующие решения рассматриваются только из предположения о возможности посадки БПЛА на один объект. Рассмотренная же задача исходит из предпосылки о том, что отдельный наземный робот группы имеет недостаточные размеры для успешной посадки на него БПЛА.

В рамках исследования была рассмотрена задача управления гетерогенной группой роботов с целью посадки БПЛА на платформу, образуемую корпусами наземных роботов.

Она рассматривалась не в общей постановке, а с рядом ограничений, в том числе с ограничением количественного состава группы. В первом приближении рассматривалась группа, состоящая из трех наземных роботов, имеющих цилиндрическую форму, и одного БПЛА (мультироторного типа).

В рамках задачи вводится ограничение, что разрешенной поверхностью для посадки является только верхняя часть корпуса наземного робота. При

этом считается, что площади одного робота недостаточно для успешной посадки на него БПЛА, поэтому наземным роботам необходимо образовать своими корпусами платформу, на которую сможет совершить посадку БПЛА. Условием поставленной задачи оговаривается, что образованием платформы, достаточной для посадки на нее БПЛА площадью, является размещение трех наземных роботов в формацию.

Область действия группы представляет собой плоское ровное поле с препятствиями, представленными в виде призм произвольной формы, и воздушное пространство над ним, необходимое для осуществления полета БПЛА. Высота препятствий превышает высоту наземных роботов таким образом, что позволяет однозначно различать роботов и препятствия между собой сенсорным системам роботов, но при этом значительно меньше высоты эшелонов полета БПЛА и не создают помех для его посадки. Также препятствия не образуют замкнутых контуров с заключенными внутри них одного или нескольких роботов. Расположение препятствий группе неизвестно.

Также предполагалось, что определение собственного местоположения робота и расположения объектов окружающей среды сенсорной системой робота производится точно, без погрешностей. Координаты собственного положения и заданной БПЛА точки посадки в начальный момент времени членам группы известны. Причем БПЛА может не обладать заранее информацией о наличии или отсутствии препятствий и, соответственно, возможности или невозможности образования наземными роботами платформы возле заданной точки, а стартовые позиции роботов могут находиться на значительном удалении друг от друга.

Предполагается, что в начальный момент времени БПЛА выполняет собственную миссию, по завершению которой он и должен будет совершить посадку в заданной точке. Из-за этого БПЛА способен осуществлять поддержку наземным роботам только в виде управляющего центра, решающего спорные, конфликтные и нестандартные ситуации и не может помочь с картографированием местности и построением пути к заданной точке посадки.

Для выполнения задачи необходимо обеспечить перемещение роботов из стартового положения в окрестность точки посадки, образовать ими там платформу, и осуществить посадку БПЛА на платформу.

Поскольку в области выполнения задания группой присутствуют препятствия, и наземные роботы не обладают точной картой местности, роботам необходимо обнаруживать препятствия и обходить их для достижения окрестности точки посадки, в дальнейшем называемой областью построения, и построения в формацию, образующую платформу, требуемую для посадки БПЛА. Для обнаружения препятствий каждый наземный робот использует сенсорную систему, которая, в соответствии с условиями задачи,

способна точно различать объекты в поле видимости и определять их расположение. Для обхода обнаруженных препятствий – методы локальной навигации, позволяющие избегать столкновений с препятствиями, которые не были обнаружены заранее или которые являются подвижными и их текущее местоположение не может быть установлено заранее. В предложенном решении в качестве метода локальной навигации используется модифицированный метод тангенциального избегания, учитывающий размер робота. Используя этот метод, робот следует по направлению касательной к границе препятствия в точку, которая находится ближе всего к нему, всякий раз, когда препятствие обнаруживается на расстоянии ближе к роботу, чем заданное [5].

После начала выполнения задания роботы будут стремиться достичь области построения, по достижению которой приступят к построению в формацию для образования посадочной платформы. Стоит отметить, что достигать границу области построения, а соответственно и приступать к построению в формацию, роботы будут не одновременно из-за различий в стартовых позициях и встречаемых по пути препятствий. Формация имеет форму равностороннего треугольника, где роботы располагаются в вершинах треугольника, а центром треугольника выступает точка посадки (рис. 1).

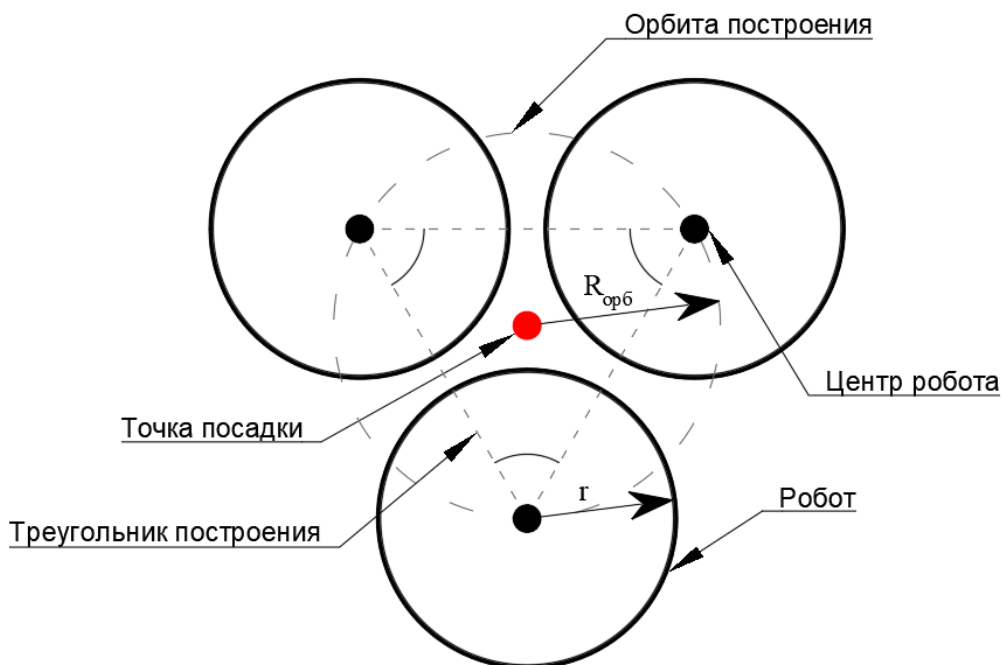


Рис. 1. Расположение роботов в формации возле точки посадки

Поскольку в общем случае обстановка в области посадки неизвестна, были рассмотрены возможные ситуации расположения препятствий в

области построения и определены для них действия наземных роботов. В том числе были рассмотрены действия группы в случае невозможности построения наземных роботов в формацию возле заданной точки посадки.

После завершения образования роботами платформы, они отправляют соответствующие сигналы БПЛА, который после завершения собственной миссии совершает посадку на платформу. В результате исследований было сформировано управление в виде алгоритма действия группы.

В продолжении исследований планируется получить решение задачи для более общего случая. Для этого планируется в первую очередь получить решение задачи для неидеальных условий, таких как наличие погрешностей при определении собственного местоположения и расположения окружающих объектов. Вместе с этим планируется провести анализ существующих методов посадки БПЛА на неподвижные мобильные средства и определить среди них подходящие для использования при посадке БПЛА на платформу, образованную корпусами нескольких неподвижных роботов, а в случае необходимости - разработать новые.

Затем будет рассмотрена задача с учетом наличия динамических препятствий и препятствий, имеющих более общий вид, по сравнению с уже использованными препятствиями в виде призм. Такие препятствия, например, могут иметь разную высоту или изменяющуюся по высоте геометрическую форму. Также планируется получить решение задачи, используя децентрализованный подход управления и централизованный подход с одним из наземных роботов в качестве лидера. После чего провести сравнение полученных решений.

После проведения предложенных выше исследований и проверки их результатов с помощью экспериментов, задачу планируется расширить на большее количество форм корпусов роботов и членов группы.

Заключение. По результатам проведенного исследования было получено решение в первом приближении для задачи управления гетерогенной группой роботов с целью посадки БПЛА на формируемую корпусами наземных роботов платформу. Представлены основные планы по дальнейшим исследованиям темы.

Библиографический список

1. Габдуллин, А.Р. ROS-моделирование взаимодействия БПЛА и наземного беспилотного робота для решения задачи планирования маршрута в статической среде / А.Р. Габдуллин, А.К. Буйвал, Р.О. Лавренов, Е.А. Магид // Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта: труды семинара, Иннополис, 22–23 сентября 2016 года / Российская ассоциация искусственного интеллекта. – Иннополис: Издательство «Перо», 2016. – С. 21–30.

2. Cantelli, L. Autonomous cooperation between UAV and UGV to improve navigation and environmental monitoring in rough environments / L. Cantelli, M. Lo

Presti, M. Mangiameli, C.D. Melita, G. Muscato // 10th International Symposium on Humanitarian Demining coupled with the 11th IARP WS HUDEM'2013. – 23 April 2013, Šibenik, Croatia.

3. Нго, Т.К. Концептуальная и графовая модели взаимодействия беспилотного летательного аппарата с наземной робототехнической сервисной платформой. / Т.К. Нго // Интеллектуальные технологии на транспорте. – 2019. – № 3 (19). – С. 35–41.

4. Кулапин, В. Автоматическая система управления прецизионной посадкой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на наземную платформу беспроводной зарядки. / В. Кулапин, А. Князьков, А. Егорихин, П. Шевцов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество», Пензенский государственный университет, Пенза, 2015. – С. 244–246.

5. Ferreira, A. A new approach to avoid obstacles in mobile robot navigation: tangential escape / A. Ferreira, F. Pereira, R. Frizera, T. Bastos // International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO). – 2005. – No. 19 (4). – P. 395–405.

АЛГОРИТМ ПРИБЛИЖЕННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ СО МНОГИМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Н.И. Шушко, М.В. Губко

Для решения задачи стохастической оптимизации режимов электрических сетей с накопителями электроэнергии предлагается модификация алгоритма приближенного динамического программирования для линейной постановки задачи. Особенностью алгоритма является использование анализа чувствительности для обновления функций Беллмана всех накопителей электроэнергии из решения единственной оптимизационной задачи. Это позволяет сократить количество вычислений, что особенно важно для сетей с большим количеством накопителей электроэнергии вычислений, что особенно важно для сетей с большим количеством накопителей электроэнергии.

Ключевые слова: линейное программирование, приближенное динамическое программирование, задача планирования режимов работы электросети.

Введение. Возобновляемая электроэнергия получает все более широкое распространение в сетях электроснабжения. Стохастический характер генерации солнечной и ветряной электроэнергии усложняет использование соответствующих генераторов, однако эти трудности можно решить установкой систем накопления электроэнергии. В то же время, глубокое проникновение накопителей электроэнергии в распределительные сети кардинально меняет задачу планирования режимов работы электрических сетей, которое должно производиться на широком горизонте планирования (до нескольких дней), чтобы предоставить пользователям дальновидную политику управления ресурсами. Кроме того, максимальная эффективность энергетической системы подразумевает скоординированное управление широким спектром распределенных ресурсов генерации и хранения, что приводит к задаче оптимизации высокой размерности даже для отдельной распределительной сети.

Одним из перспективных подходов к решению многопериодных стохастических задач является метод приближенного динамического программирования [2, 3]. В работе [1] предлагается вариант алгоритма приближенного динамического программирования который показал быстрые темп сходимости для сетей с одним накопителем. В настоящем

докладе описывается модификация этого алгоритма для задачи оптимизации режимов электрических сетей с несколькими накопителями электроэнергии.

Формулировка проблемы в форме задачи стохастического линейного программирования. Рассмотрим задачу планирования режимов работы электроэнергетической системы (ЭЭС) на T периодов, каждый из которых имеет продолжительность Δ минут. Сама сеть представляет собой граф со множеством V узлов. В каждом узле $v \in V$ находится N_v пользователей, которые могут обладать двумя типами электрических устройств: накопители электроэнергии и приборы, только потребляющие электроэнергию. Обозначим через A_{vi} количество приборов потребления у i -ого пользователя в узле v . Для j -ого прибора зададим прогноз потребления $d_{vij}(t)$ в период $t = 1, \dots, T$, и наложим ограничение на количество использованной энергии $a_{vij}(t)$:

$$d_{vij}(t) \leq a_{vij}(t) \leq D_{vij}(t).$$

Недопотребление электроэнергии прибором влечет штраф в размере $\pi_{vij}(t)$ руб. за кВт·ч. Множество накопителей электроэнергии у i -ого потребителя в узле v обозначим B_{vi} . Для j -ого накопителя введем стоимости зарядки/разрядки p_{vij}^c и p_{vij}^r , отвечающие за его износ, коэффициенты эффективности зарядки/разрядки η_{vij} , ψ_{vij} , коэффициент утечки заряда ν_{vij} . Тогда динамика заряда в накопителе задается равенством:

$$\tilde{\sigma}_{vij}(t) = (1 - \nu_{vij}\Delta)\sigma_{vij}(t) + \eta_{vij}c_{vij}(t) - \frac{r_{vij}(t)}{\psi_{vij}},$$

где $\sigma_{vij}(t)$ – энергия, накопленная к началу периода планирования t , $c_{vij}(t)$ – количество энергии, поступившей в течение периода, $\tilde{\sigma}_{vij}(t) \equiv \sigma_{vij}(t+1)$, а $r_{vij}(t)$ – энергия разрядки накопителя. Ограничим зарядку и разрядку максимальными скоростями зарядки C_{vij} и разрядки R_{vij} соответственно:

$$\frac{c_{vij}(t)}{C_{vij}} + \frac{r_{vij}(t)}{R_{vij}} \leq \Delta.$$

Обозначим энергию из сети, потребляемую i -м пользователем в узле v в период t через $n_{vi}(t)$ и ограничим потребление сверху и снизу:

$$-\underline{n}_{vi}(t) \leq n_{vi}(t) \leq \bar{n}_{vi}(t).$$

Пусть $g_{vij}(t)$ – объем электроэнергии, сгенерированной в периоде $t = 1, \dots, T$ j -м распределенным генератором i -го пользователя в узле $v \in V$. Генерация ограничена параметром $G_{vij}(t)$:

$$0 \leq g_{vij}(t) \leq G_{vij}(t).$$

Локальный энергетический баланс пользователя запишется так:

$$n_{vi}(t) = \sum_{j=1}^{S_{vi}} g_{vij}(t) - \sum_{j=1}^{A_{vi}} a_{vij}(t) + \sum_{j=1}^{B_{vi}} [r_{vij}(t) - c_{vij}(t)].$$

Помимо потребителей в узлах сети могут находиться источники энергии, множество которых назовем S_v . Количество энергии, произведенной i -м источником в v узле в период t , обозначим через $s_{vi}(t)$, а цену этой энергии – через $p_{vi}(t)$. Между собой узлы соединяют линии электропередач $E \in V \times V$. Для каждой линии $vv' \in E$ вводятся характеристики: $R_{vv'}$ – сопротивление, $X_{vv'}$ – реактивное сопротивление, $B_{vv'}$ – проводимость, $Z_{vv'}$ – эффективное сопротивление

$$Z_{vv'} = \frac{R_{vv'}^2 + X_{vv'}^2}{X_{vv'}} R_{vv'}.$$

Также введем переменные потока энергии в линии $f_{vv'}(t)$ и переменные потери в линии $L_{vv'}(t)$. Поток энергии принимает положительное значение при направлении от v к v' и отрицательное значение в обратном направлении. Потери в линии имеют квадратичную зависимость от потока:

$$L_{vv'}(t) = Z_{vv'} f_{vv'}^2,$$

поэтому линеаризируем эту зависимость с помощью адаптивной кусочной линеаризации и представим ее в виде последовательности касательных. Плотность построения касательных к функции контролируется относительной погрешностью аппроксимации так, чтобы погрешность не превышала заданного порога. Баланс энергии в узле $v \in V$ для каждого периода t записывается следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{M_v} s_{vi}(t) + \sum_{i=1}^{N_v} n_{vi}(t) = \sum_{vv' \in E} \left[f_{vv'}(t) + \frac{L_{vv'}(t)}{2} \right].$$

Вектор управления $\bar{u}(t)$ включает в себя все свободные переменные модели: потребление $a_{vij}(t)$ всех электроприборов у всех пользователей; накопленная энергия $\sigma_{vij}(t)$, энергии зарядки $c_{vij}(t)$ и разрядки $r_{vij}(t)$ для всех накопителей у всех пользователей; объем электроэнергии, выработанной генератором, $s_{vi}(t)$ и переменные потоков $f_{vv'}(t)$.

Целевая функция i -ого пользователя в узле v в период $t \in 1, \dots, T$:

$$K_{vi,t}^{(c)}(\cdot) := \sum_{j=1}^{A_{vi}} \pi_{vij}(t) \left(D_{vij}(t) - a_{vij}(t) \right) + \sum_{j=1}^{B_{vi}} \left(p_{vij}^r r_{vij}(t) + p_{vij}^c c_{vij}(t) \right) + \sum_{j=1}^{S_{vi}} \kappa_{vij}(t) g_{vi}(t).$$

Целевая функция для периода $t \in 1, \dots, T$:

$$K_t(\bar{u}(t), \bar{\sigma}(t)) = \sum_{v \in V} \left\{ \sum_{i=1}^{M_v} p_{vi}(t) s_{vi}(t) + \sum_{i=1}^{N_v} K_{vi,t}^{(c)}(\cdot) \right\},$$

для всего горизонта планирования:

$$K_t(\bar{u}(t), \bar{\sigma}(t)) = \sum_{v \in V} \left\{ \sum_{i=1}^{M_v} p_{vi}(t) s_{vi}(t) + \sum_{i=1}^{N_v} K_{vi,t}^{(c)}(\cdot) \right\}.$$

Алгоритм приближенного динамического программирования. Традиционно алгоритм приближенного динамического программирования представляет собой декомпозицию сложной многопериодной оптимизационной задачи на более простые однопериодные задачи. Влияние локальных решений в каждой подзадаче на целевую функцию определяется функцией Беллмана:

$$W_t(\bar{\sigma}(t)) = \sum_{v \in V} \sum_{i=1}^{N_v} \sum_{j=1}^{B_{vi}} W_{vij,t}(\tilde{\sigma}_{vij}(t)).$$

В рамках рассматриваемого подхода для каждого периода функция Беллмана представляется в виде кусочно-линейной функции:

$$w_{vij}(t) \geq \alpha_{vij}^{(m)}(t) + \beta_{vij}^{(m)}(t) \tilde{\sigma}_{vij}(t), m = 1, \dots, H_{vij}.$$

Коэффициенты $\alpha_{vij,t}^{(m)}$ и $\beta_{vij}^{(m)}(t)$ обновляются на каждой итерации процесса обучения. Далее рассмотрим подробнее, как обновляется коэффициент наклона функции Беллмана $\beta_{vij}^{(m)}(t)$.

Значение наклона $\beta_{vij}^{(m)}(t)$ определяется маржинальной ценой заряда в этот период, которая находится как производная целевой функции по накопленному заряду:

$$c_t = \frac{K_t(\bar{u}(t), \bar{\sigma}(t) + \delta \bar{\sigma}(t)) - K_t(\bar{u}(t), \bar{\sigma}(t))}{\delta \sigma_{vij}(t)}.$$

Для вычисления маржинальной цены приходится решать задачу два раза – с возмущением начального заряда в накопителе и без возмущения. Если в сети находится несколько накопителей электроэнергии, то количество повторных решений задачи увеличивается пропорционально их числу.

Алгоритм в статье [1] основан на отслеживании маржинальной цены энергии в накопителе с течением времени путем соединения последовательностей однопериодических подзадач, в которых инкрементное возмущение приводит к удержанию дополнительной энергии.

Рассмотрим случай одного накопителя в сети. Будем отслеживать переменные $\Delta_t^+ = \frac{\bar{\sigma}^+(t) - \bar{\sigma}(t)}{\delta \sigma(t)}$, $\Delta_t^- = \frac{\bar{\sigma}^-(t) - \bar{\sigma}(t)}{\delta \sigma(t)}$, которые показывают влияние изменения заряда в накопителе электроэнергии в начале периода на его накопленный заряд в конце периода. В конце горизонта планирования на основе полученных маржинальных цен во всех периодах пересчитаем значение наклона функции Беллмана v_t^+ для соответствующего накопленного заряда в конце периода:

$$v_t^+ = \begin{cases} c_t^{vij} + \Delta_t^+ v_{t+1}^+ & 0 \leq t < T, \\ c_T^{vij} & \text{иначе,} \end{cases}$$

аналогично для v_t^- .

В случае сети со множеством накопителей электроэнергии формула не меняет вид, однако v_t^+ и c_t теперь являются вектор-столбцами размерности M , а Δ_t^+ – квадратная матрица размерности, равной количеству накопителей в электросети. Значение (i, j) матрицы Δ_t^+ показывает изменение заряда в накопителе j в конце периода из-за изменения заряда в начале периода в i -ом накопителе электроэнергии.

Использование постановки задачи планирования режимов работы электросети с накопителями электроэнергии в форме задачи линейного программирования имеет свои преимущества в вычислении наклонов функции Беллмана. Значения маржинальных цен можно получить из двойственных переменных ограничений, а значения индикаторов Δ_t^+ и Δ_t^- можно получить на основе анализа возмущений в задаче линейного программирования [4]. Значение начального заряда в накопителе электроэнергии в начале периода задается ограничением вида равенство. Значит малое изменение заряда в начале периода эквивалентно изменению вектора правых частей задачи. Тогда, если ограничения возмущенной задачи можно представить как $Ax = b + b'$ и возмущение является настолько малым, что оптимальный базис решения не меняется, то решение возмущенной задачи можно найти по формуле

$$x' = x^* + B^{-1}b',$$

где B – оптимальный базис задачи (см. определение базиса задачи в [4]), x^* – оптимальное решение невозмущенной задачи. Большинство программных пакетов решения задач линейного программирования позволяют получить обратную базисную матрицу B^{-1} без дополнительных вычислений.

Заключение. Использование результатов теории чувствительности задач линейного программирования потенциально позволяет ускорить алгоритм приближенного динамического программирования, предложенный в статье [1], и делает его применимым для сетей с большим количеством накопителей электроэнергии. Постановка задачи в форме задачи линейного программирования позволяет не производить дополнительные вычисления при определении маржинальной цены и индексов сохранения заряда для каждого накопителя электроэнергии, так как можно получать нужные значения из базисной матрицы и двойственных переменных ограничений. Перспективы исследования связаны с программной реализацией и анализом вычислительной эффективности предложенного алгоритма.

Библиографический список

1. Salas, D. Benchmarking a scalable approximate dynamic programming algorithm for stochastic control of multidimensional energy storage problems / D. Salas, W. Powell // *INFORMS Journal on Computing*. – 2013. –Vol. 30. –No 1. –P. 106-123
2. Goubko, M. Approximate Dynamic Programming Decompositions for Economic Dispatch in Microgrids / M. Goubko, N. Shushko // *IFAC-PapersOnLine*. – 2022. – Vol. 55, No. 9. – P. 262–267.
3. Powell, W. Approximate Dynamic Programming: Solving the curses of dimensionality / W. Powell // *John Wiley & Sons*. –2007. –Vol. 703.

4.Dantzig, G. Linear Programming and Extensions / G. Dantzig. – Princeton University Press, 2016.

СЕКЦИЯ II
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В УПРАВЛЕНИИ

УДК 728.22: 004

**РЕКОМЕНДАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АРХИТЕКТОРОВ
И ДИЗАЙНЕРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОЛЕРНЫХ ПАСПОРТОВ
ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

И.Е. Алексеева, О.Ю. Болотова

Рассматривается важность и необходимость использования технологий искусственного интеллекта и машинного обучения в строительной отрасли. Поднимается одна из важных проблем: колористика фасадов зданий. В качестве решения данной проблемы авторами было создано приложение, которое способно обрабатывать фотографии фасадов зданий, а также рендер-изображения проектируемых объектов, основанное на применении последних достижений отечественных ученых. При этом, зарубежных аналогов данного решения нет.

С помощью количественного анализа данных о частоте использования цветов различного спектра в ходе предварительных научных исследований удалось обнаружить, какие цвета наиболее релевантны тем или иным городам (как российским, так и зарубежным), в том числе какие города похожи друг на друга. Выявленные закономерности легли в основу рекомендательной системы, способной подбирать палитру цветов при разработке фасада здания с учетом городской среды. Также приведены перспективные направления развития разработанной технологии.

Ключевые слова: информационные технологии, обработка изображений, спектральные цвета, интеллектуальный анализ данных, рекомендательная система, дизайн, фасады зданий, колерный паспорт, архитектура, объекты капитального строительства.

В настоящее время разработкой паспортов внешнего облика (колерного паспорта) объектов капитального строительства занимаются профессиональные архитекторы и дизайнеры, а цветовое решение подбирается, исходя из их опыта, вкуса и представления о гармоничном сочетании цветов, представленных в окружении проектируемого здания и

т.д. Выбор цветового решения во многом носит субъективный характер. Объективные критерии, по которым можно было сравнивать предлагаемые архитекторами и дизайнерами фасады, на текущий момент времени отсутствуют.

На текущий момент времени, систем поддержки принятия решений для цветового оформления фасадов зданий в России и в мире еще не было. Решение, предлагаемое в рамках настоящего исследования, основано на применении технологий интеллектуального анализа оцифрованных данных, в частности изображений фасадов зданий.

В качестве исходных данных в сервисе Карты Google были выборочно собраны изображения фасадов зданий многоквартирных домов 15 российских городов с населением свыше одного миллиона жителей: Волгоград, Воронеж, Екатеринбург, Казань, Красноярск, Москва, Нижний Новгород, Новосибирск, Омск, Пермь, Санкт-Петербург, Ростов-на-Дону, Самара, Уфа, Челябинск.

Исследование выполнено с помощью универсальной когнитивной аналитической системы «ЭЙДОС-Х++» [1, 2]. На базе системы «ЭЙДОС-Х++» авторами настоящего исследования было создано прикладное Эйдос-приложение «Интеллектуальный спектральный анализ изображений фасадов жилых многоквартирных домов».

Исходные изображения, участвующие в машинном обучении системы «ЭЙДОС-Х++» доступны в депозитарии [3]. В [3] собраны изображения не всех зданий, расположенных на территории указанных городов, поэтому собранные изображения следует воспринимать как статистическую выборку. Репрезентативность выборки подтверждается устойчивостью результатов анализа цифровых данных.

На текущем этапе исследования авторами подтверждена [4] гипотеза о существовании цветовых закономерностей, используемых при разработке колерных паспортов многоквартирных домов, выполнен спектральный анализ изображений фасадов зданий многоквартирных домов и определены абсолютные и относительные частоты использования различных спектральных цветов у отдельных домов, расположенных в различных городах и странах.

Ниже (рис. 1) показаны цвета и варианты их оттенков, наиболее характерные г. Пермь.

С помощью созданного приложения был проведен анализ колерных паспортов многоквартирных домов, которые строились в Перми в течение 2021–2022 годов, на предмет соответствия локальным цветовым особенностям (см. рис. 1). Для тех новостроек, которые по результатам распознавания оказались более похожи на другие города, чем на Пермь, были разработаны рекомендации по изменению колерных паспортов.

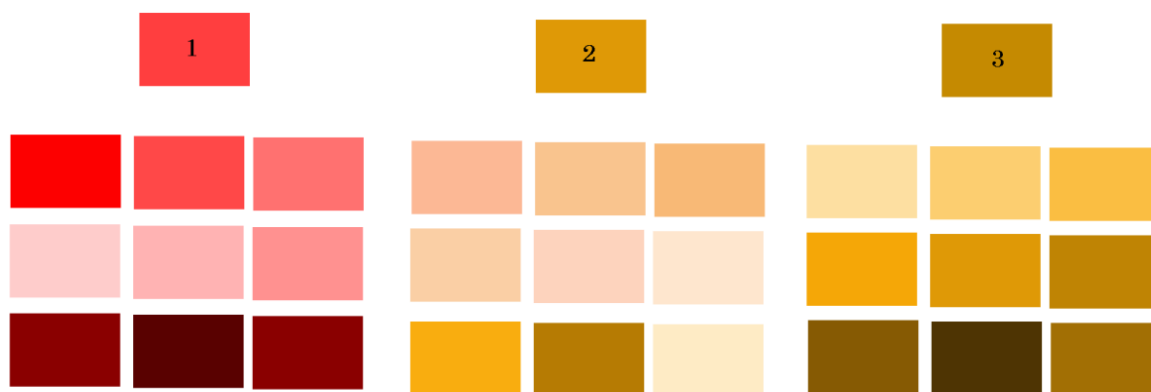


Рис. 1. Варианты оттенков наиболее характерных цветов г. Пермь

Ниже на рисунке 2 представлен исходный вид фасада здания, распознанного системой как не похожей на Пермь. На рисунке 3 представлены альтернативные варианты дизайна фасада новостройки. При разработке альтернативных вариантов дизайна фасада использовались только те сочетания оттенков (см. рис. 1), изображения с которыми распознавались как Пермские на 100%.



а)

Рис. 2. Исходная визуализация фасада здания, распознанного как не Пермский [4]

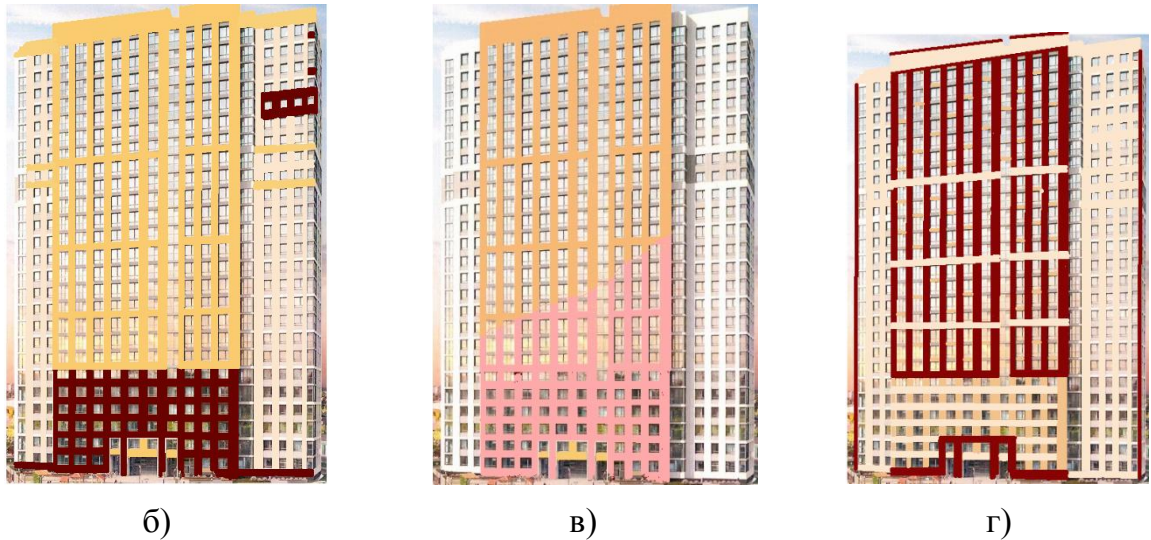


Рис. 3. Альтернативные варианты дизайна фасада [4]

Текущая версия Эйдос-приложения способна учитывать выявленные закономерности только для 15 исследованных городов. В будущем планируется, во-первых, расширить обучающую выборку, включив в нее как новые изображения зданий 15 исследованных городов, так и изображения других российских городов, помимо этого планируется включить в выборку изображения европейских зданий, во-вторых, детализировав информацию об объектах в выборке с целью проведения разносторонних исследований, например, добавив климатические сведения об объектах, можно будет исследовать какие цвета и сочетания характерны северным широтам и т.п.

Параллельно настоящему исследованию в ПНИПУ ведутся работы по созданию аналогичных решений для зданий дошкольных образовательных учреждений. В будущем планируется расширить на дошкольные образовательные учреждения, спортивные комплексы и другие общественные здания.

Также необходимо отметить, что в творческом процессе поиска цветового оформления фасадов зданий человека не заменить, таким образом, созданное авторами приложение, способное упростить и снизить объем работы, следует воспринимать исключительно как рекомендательную систему или систему поддержки принятия решений.

Со временем планируется создать продукт в виде программного автономного модуля (цифровой помощник), который можно установить на любой компьютер, для проведения спектрального анализа изображений фасадов зданий и получения палитры рекомендуемых цветов при разработке паспорта внешнего облика (колорного паспорта) объекта капитального строительства. Либо цифровой помощник будет представлять собой веб-приложение.

По мнению, авторов, создаваемая авторами рекомендательная система будет востребована среди архитекторов, дизайнеров, девелоперов и других специалистов, работающих в области дизайна городской среды. Помимо этого, данная система сможет использоваться для аудита эскизных проектов и исследования городских пространств.

Библиографический список

1. Универсальная когнитивная аналитическая система «ЭЙДОС-Х++» (Система «ЭЙДОС-Х++»): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Луценко Е.В. – № 2012619610; заявл. № 2012617579; поступ. 10.09.2012; опубл. 24.10.2012. Бюл. №10. – 1 с.
2. Виртуальный on-line Центр системно-когнитивных исследований «Эйдос» : сайт / Луценко Евгений Вениаминович. – URL: <http://lc.kubagro.ru/> (дата обращения 27.08.2021).
3. Обучающий датасет. – URL: <https://disk.yandex.ru/d/xW0v7j10nhc3hg> (дата обращения 09.04.2021).
4. Алексеева, И.Е. Исследование колористических особенностей оформления фасадов многоквартирных домов с помощью технологий интеллектуального анализа данных / И.Е. Алексеева, О.Ю. Болотова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2021. – № 3. – С. 78–92.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛОРИСТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОФОРМЛЕНИЯ ФАСАДОВ ЗДАНИЙ ДОШКОЛЬНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ С УЧЕТОМ ЭМОЦИОНАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

И.Е. Алексеева, О.Ю. Болотова, М.Н. Тетерин

Исследуются колористические особенности цветового оформления фасадов дошкольных образовательных учреждений с помощью интеллектуальных технологий анализа цифровых изображений. В качестве исходных данных были собраны цифровые изображения фасадов зданий детских садов, построенных в 2018-2022 годах. На первом этапе исследования выполнена эмоциональная оценка изображений фасадов зданий дошкольных образовательных учреждений путем анкетирования заинтересованных лиц: воспитанников, родителей, сотрудников детских садов и профессиональных архитекторов и дизайнеров. На втором этапе был выполнен спектральный анализ изображений фасадов зданий дошкольных образовательных учреждений и определены абсолютные и относительные частоты использования различных спектральных цветов у каждого отдельного объекта исследования. Это позволило решить задачу классификации, где в качестве классов использовались эмоциональные отношения к изображениям, а спектральный анализ изображений выполнялся в универсальной когнитивной аналитической системе «ЭЙДОС-Х++».

В результате исследования определены спектры цветов, относящиеся к положительному классу, а также их значимость. На основе самого влиятельного из них было проведено сопоставление с рекомендуемыми веб-приложением Adobe Color спектрами с помощью разных цветовых схем. В результате были определены наиболее подходящие цветовые схемы для разработки колерных паспортов зданий дошкольных образовательных учреждений: монохромная и комплементарная.

Ключевые слова: информационные технологии, спектральные цвета, интеллектуальный анализ данных, фасады зданий, колерный паспорт, архитектура, объекты капитального строительства.

Технологии искусственного интеллекта и машинного обучения сегодня активно внедряют в архитектуру и градостроительство. Они помогают оптимизировать планировочные решения, инженерные системы, а также обеспечить безопасные и комфортные условия жизни людей.

Колористика также является важным аспектом в формировании архитектурного пространства, она рассматривается как система, которая включает в себя созданную человеком архитектуру и цветовое окружение природных объектов. В городской среде достаточно трудно добиться правильного сочетания цветов. Именно поэтому авторами ставится задача разработка методических рекомендаций для составления паспортов внешнего облика объектов капитального строительства на примере зданий дошкольных образовательных учреждений.

На текущий момент есть интеллектуальная технология спектрально-когнитивного анализа цифровых изображений [1], с помощью которой в 2021 году было создано Эйдос-приложение [2] для анализа рендер-изображений или фотографий зданий многоквартирных домов.

Данная технология применима к социально-значимым объектам, таким как здания дошкольных образовательных организаций, общеобразовательные школы, больницы, физкультурно-оздоровительные комплексы и т.п. Выбор социально-значимых объектов в качестве объекта исследования основан на рекомендациях главного архитектора города Перми.

Однако при обработке изображений и выявлении рекомендуемых цветовых спектров требуется учесть их привлекательность, а не локальные городские условия как в работе [3]. Поэтому в нашем исследовании требуется промаркировать исследуемые изображения по степени их эмоциональной привлекательности для лиц, которые будут непосредственно сталкиваться с объектами на изображениях в повседневной жизни по роду профессиональной деятельности или иным обстоятельствам.

На сегодняшний день существует множество методов эмоциональной оценки изображений, которые условно можно разделить на две основные группы: прямые, с помощью которых мы непосредственно от респондентов узнаем их отношение к изображению, и косвенные, которые позволяют более точно узнать отношение респондента к изображению с помощью различных приборов или оценки его поведения.

В связи с тем, что косвенные методы эмоциональной оценки изображений требуют гораздо больше времени и ресурсов на исследование, в данной работе использованы прямые методы, так как они не требуют специального оборудования и программного обеспечения.

Для решения поставленной задачи в качестве исходных данных на сайтах дошкольных образовательных учреждений были собраны цифровые изображения фасадов зданий дошкольных образовательных учреждений, построенных в 2018–2022 годах. Исходные изображения, участвующие в исследовании доступны в [4].

Первая часть исследования проводилась в виде анкетирования среди групп заинтересованных лиц: воспитанники, родители, работники дошкольных образовательных учреждений и профессиональные архитекторы и дизайнеры. Каждая анкета включала в себя 10 изображений фасадов зданий дошкольных образовательных учреждений, которые были представлены в 4 разделах анкеты: оценка приятности изображения, оценка неприятности изображения, оценка приятности изображения по пятибалльной шкале и выбор трех наиболее приятных изображений из десяти.

По завершению анкетирования его результаты были собраны и проанализированы. В общем было обработано 294 анкеты.

По результатам опроса была создана база данных, состоящая из 290 отсортированных по эмоциональному отношению изображений фасадов зданий дошкольных образовательных учреждений. База данных разделяется на 3 класса: «Positive», состоящий из 96 изображений, «Negative», состоящий из 94 изображения, и «Neutral», состоящий из 100 изображений.

Решение задач второй части исследования выполнено в универсальной когнитивной аналитической системе «ЭЙДОС-Х++» [5], разработанной профессором Евгением Вениаминовичем Луценко [1]. На базе системы «ЭЙДОС-Х++» авторами настоящего исследования было создано прикладное Эйдос-приложение «АСК-анализ изображений фасадов дошкольных образовательных учреждений».

С помощью системы «ЭЙДОС-Х++» был выполнен интеллектуальный анализ данных, в результате которого были определены спектры, относящиеся к положительному классу, а также их значимость.

На рис. 1 показаны наиболее значимые синаптические связи между 3 обобщенными классами (верхний ряд), которые рассматриваются в качестве аналогов нейронов, и тридцатью пятью спектральными цветами (нижний ряд), которые рассматриваются как аналоги рецептронов.

Например, на рисунке выше (см. рис. 1) классу «Positive» соответствует нейрон № 3 (2-й слева в верхнем ряду). Связи с красными линиями показывают характерные цвета. Были выделены наиболее приятные цвета, а именно рецептроны № 14, 28, 9, 12 и 32 (2-й, 3-й, 4-й, 5-й и 6-й в нижнем ряду соответственно). Самое сильное влияние на класс «Positive» (см. рис. 1) оказывает рецептрон №14, имеющий в системе RGB кодирование {039,251,091}. На его основе было проведено сопоставление с рекомендуемыми веб-приложением Adobe Color [6] спектрами с помощью разных цветовых схем. По результатам сопоставления были определены наиболее рекомендуемые правила гармонии цветов для разработки колерных паспортов зданий дошкольных образовательных учреждений: монохромная и комплементарная цветовые схемы. Ниже на рисунках

(рис. 2) и (рис. 3) показаны рекомендуемые Adobe Color цвета для монохромной и комплементарной цветовых схем.

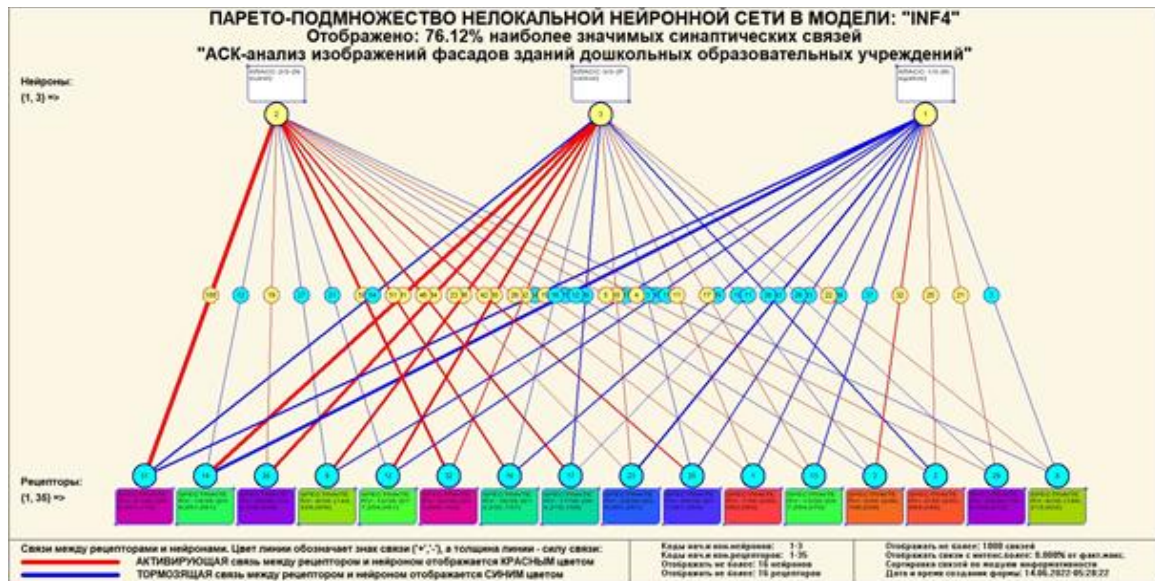


Рис. 1. Парето-подмножество нелокальной нейронной сети в модели INF4

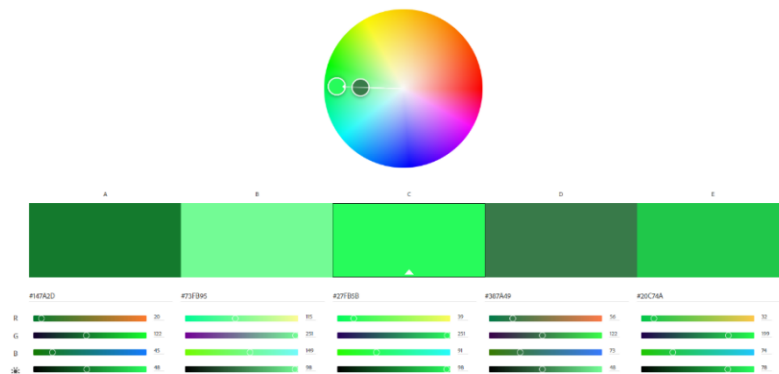


Рис. 2. Рекомендуемый Adobe Color цвет в формате RGB для монохромной цветовой схемы

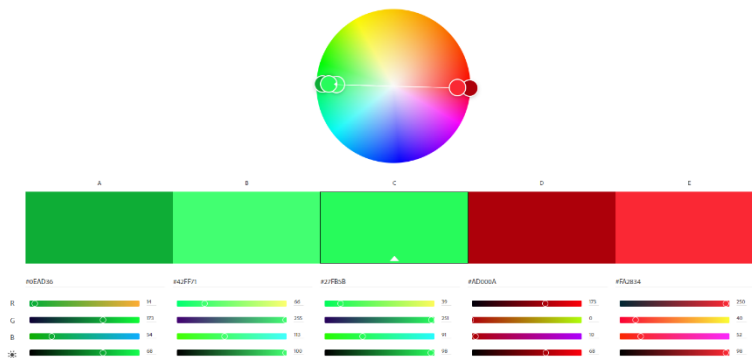


Рис. 3. Рекомендуемый Adobe Color цвет в формате RGB для комплементарной цветовой схемы

Также в меньшей степени, но рекомендуется использовать последовательную, двойную сплит-комплементарную и квадратную цветовые схемы.

Перспективными направлениями продолжения работы можно считать расширение базы данных изображений фасадов детских образовательных учреждений, а также увеличение количества респондентов, участвовавших в анкетировании.

Теоретическая значимость настоящего исследования заключается в том, что разработана новая технология объективного обоснования цветовых решений, рекомендуемых для составления паспортов внешнего облика (колерных паспортов) объектов капитального строительства на примере зданий дошкольных образовательных учреждений. Пока данная технология апробирована на примере дошкольных образовательных учреждений, но в будущем может быть использована при составлении рекомендуемых цветов для других социально-значимых объектов, таких как: зданий школьных образовательных учреждений, учреждений здравоохранения, учреждений культуры и т.д.

Практическая значимость исследования определяется тем, что при полноценной верификации результатов эмоциональной оценки изображений и верификации системы классификации, созданные приложения можно будет использовать не только при проектировании и строительстве новых зданий, но и при разработке проектов их капитального ремонта.

Библиографический список

1. Виртуальный on-line Центр системно-когнитивных исследований «Эйдос». – URL: <http://lc.kubagro.ru/> (дата обращения 27.05.2022)
2. Болотова, О.Ю. Разработка колерных паспортов объектов капитального строительства с помощью интеллектуальных технологий: выпускная квалификационная работа магистра: направление 08.03.01 Строительство / Болотова Ольга Юрьевна; Перм. нац. исслед. политехн. ун-т [кафедра «Строительный инжиниринг и материаловедение»]. – Пермь, 2021. 82 с.
3. Алексеева, И.Е. Исследование колористических особенностей оформления фасадов многоквартирных домов с помощью технологий интеллектуального анализа данных / И.Е. Алексеева, О.Ю. Болотова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2021. – № 3(43). – С. 78–92.
4. Google-документ. – URL: https://docs.google.com/document/d/13nAb3J0iaiWn7k4mVUW_Ue1iIV45iopV3FfwGvZyAJk/edit?usp=sharing (дата обращения 06.05.2022).
5. Универсальная когнитивная аналитическая система «ЭЙДОС-Х++» (Система «ЭЙДОС-Х++»): свидетельство о государственной регистрации

программы для ЭВМ / Луценко Е.В. – № 2012619610; заявл. № 2012617579; поступ. 10.09.2012; опубл. 24.10.2012. Бюл. № 10. – 1 с.

б. Цветовой круг, генератор цветовых палитр | Adobe Color : сайт. – URL: <https://color.adobe.com/ru/create/color-wheel> (дата обращения 10.06.2022).

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЛЮДЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ДАЛЬНОМЕРА

Р.О. Анисимов, К.А. Кулагин, Т.Я. Гладких, Н.А. Мостаков

Приведены данные тестирования алгоритма детектирования людей методом симуляции, и с использованием реального робота. Описан сбор данных и принцип обучения нейронной сети алгоритму детектирования. Проанализированы результаты тестирования и определен план дальнейших исследований, для повышения эффективности системы распознавания.

Ключевые слова: робототехника, нейронная сеть, детектирование людей, лазерный дальномер, лидар.

Введение. Развитие и востребованность сервисной робототехники растет с каждым годом. По оценкам Сбербанка [Ошибка! Источник ссылки не найден.] объем мирового рынка сервисной робототехники растет на 20% от года к году, это позволяет говорить об устойчивом тренде на все большую востребованность сервисных роботов (рис. 1).

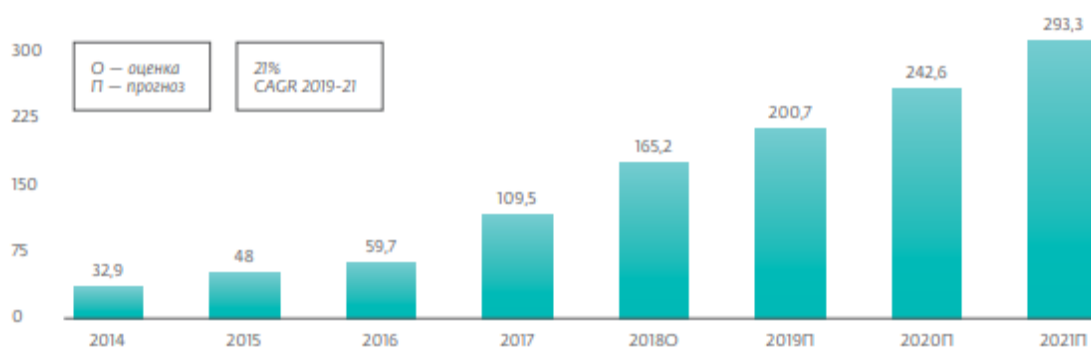


Рис. 1. Динамика продаж профессиональной сервисной робототехники, тыс. ед.

Особо интенсивно необходимость в подобного рода автоматизации возникла на фоне пандемии Sars-COV19, в данный период времени многие компании представили свои решения в области решения сервисных задач. Тем не менее крайне важным в данный момент времени является адаптация сервисных роботов для работы в общественных пространствах, такими пространствами могут выступать: торговые центры, кафе, вестибюли станций метро и так далее. Характерной чертой подобных пространств является наличие больших скоплений людей, что может вызвать непредвиденные динамические помехи. При этом столкновение робота с человеком является недопустимым событием, поэтому задача разработки алгоритма детектирования людей является актуальной.

В литературе существует множество решений, которые пытаются решить данную задачу с помощью мультисенсорного подхода, обычно используя техническое зрение и различные дальномеры[**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], но такие подходы очень дороги как с точки зрения стоимости датчиков, так и с точки зрения затрат на вычисления, необходимых для обработки и интеграции в общую системы, также данный подход неоднозначен с точки зрения генерации различными алгоритмами противоречивой информации. По этой причине более желательны системы, основанные только на дальномерах. Что касается классификаторов для обработки данных датчиков, то здесь очень популярным решением стали сверточные нейронные сети (СНС)[0]. Поэтому в данной работе рассматривается реализация алгоритма детектирования людей при помощи лазерного дальномера и нейросетевого подхода. При этом лидар обычно расположен близко к земле, поэтому задача сведется к детектированию ног людей, что значительно упростит поиск решения.

Перевод данных в формат изображения, выбор архитектуры нейросети. Так как для решения задачи используется нейросетевой подход, первоочередным этапом является перевод показаний лазерного дальномера в черно белое изображение. Для создания изображения используется набор простых выражений:

$$\begin{aligned}x_p &= z_i * \cos(\alpha), \\y_p &= z_i * \sin(\alpha),\end{aligned}$$

здесь x_p и y_p – координаты точки в СК робота конкретного измерения расстояния z_i на угле α . Затем:

$$\begin{aligned}i &= -x_p * 100 + shape, \\j &= -y_p * 50 + shape/2,\end{aligned}$$

здесь i, j – координаты пикселя на результирующем изображении, $shape$ – размерность изображения (при этом изображение квадратное). Результат работы алгоритма перевода продемонстрирован на рис. 2

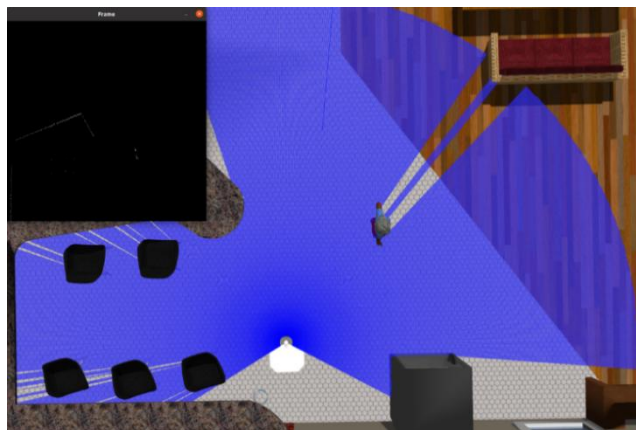


Рис. 2. Преобразование измерения дальномера в изображение

При этом данное преобразование обеспечивает уменьшение объема вычислительных данных, за счет того, что в изначальном измерении хранятся данные дробного типа, а преобразованное изображение состоит из бинарных данных.

Для тестирования алгоритма и сбора данных для обучения используется симуляционная система Gazebo, ее рабочее окно можно увидеть на рис. 3.

Задача детектирования сводится к сегментации ног людей на бинарном изображении Рис.3. Задача сегментации при помощи нейросети является подробно изученной и одним из классических решений является сеть с архитектурой U-net [4].



Рис.3. Пример бинарного отображения показаний лидара (красными кругами выделены ноги людей)

Архитектура нейронной сети. Архитектура U-Net была первоначально предложена для сегментации биомедицинских изображений. В данной работе она была адаптирована к преобразованным изображениям показаний лазерного дальномера. Она состоит в том, что обычная сверточная сеть дополняется последовательными слоями, где операторы объединения заменяются операторами апсемплинга. Таким образом, эти слои увеличивают разрешение выходного сигнала. Благодаря этому, сужающийся слой захватывает контекст, а симметричный ему расширяющийся слой позволяет точно локализовать цели.

На рис. 4 показана архитектура используемой нейронной сети. В основном, сеть состоит из сужающихся слоев в левой части и расширяющихся в правой части рисунка. Сужающиеся слои состоят из повторного применения двух сверток 3×3 , затем выпрямленного

линейного блока (ReLU) и операции объединения 4×4 с шагом 2 для понижающей выборки. На каждом шаге понижающей дискретизации удваивается количество каналов признаков. Каждый шаг в расширяющейся части состоит из повышающего преобразования 4×4 , которое уменьшает число каналов признаков, конкатенации с соответствующей картой признаков из сужающейся части и двух сверток 3×3 , за каждой из которых следует ReLU. На последнем уровне используется свертка 1×1 для сопоставления каждого 64-компонентного вектора признаков с желаемым числом классов. При этом размерность входного изображения 256×256 пикселей.

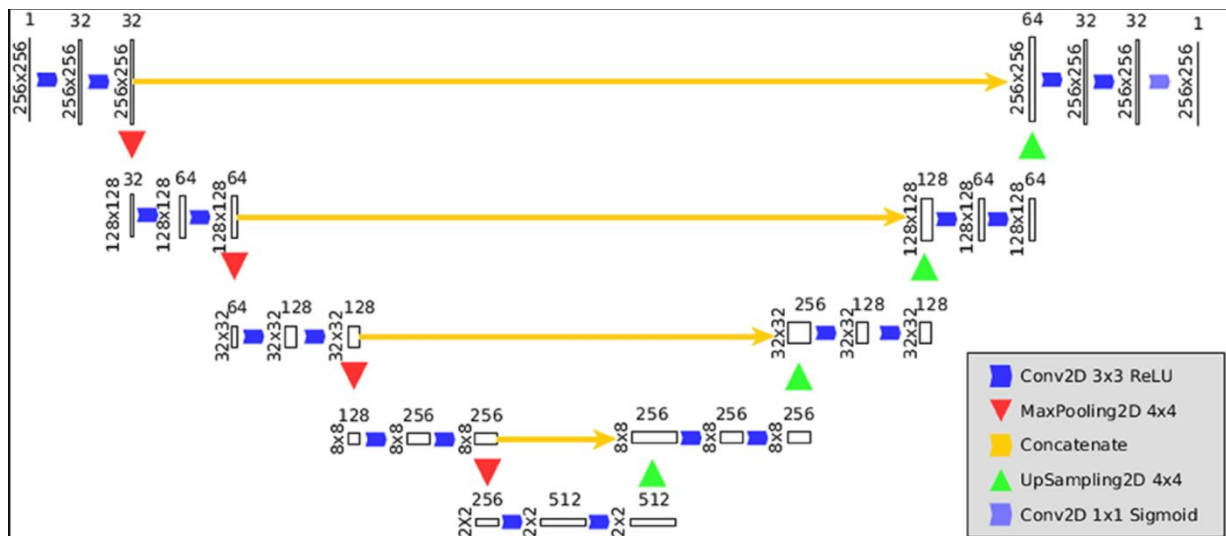


Рис. 4. Архитектура используемой нейронной сети

Сбор данных для обучения нейронной сети. Для обучения нейросети необходим набор данных из не менее чем 1000 изображений. Для сбора данных использовалась симуляционная модель в среде Gazebo, имитирующая кафе, заполненное людьми. Для каждого из полученного изображения измерения дальномера создается изображение, на котором присутствуют только ноги человека. При этом известна только глобальная позиция человека, как и глобальная позиция робота. Для получения координат человека в СК робота используются следующие преобразования:

$$T_{рч} = T_{бч} T_{бр}^{-1},$$

где $T_{бр}$ – матрица преобразования из базовой СК в СК человека, а $T_{бч}^{-1}$ матрица обратного преобразования из базовой СК в СК робота. Таким образом зная положение человека в СК робота, можно получить его координаты на бинарном изображении, используя ранее описанные формулы.

Используя данный алгоритм могут быть получены следующие пары изображений (рис. 5).



Рис. 5. Изображение показаний лазерного дальномера (а) и соответствующее ему изображение с выделенными ногами человека (б)

Используя вышеописанный алгоритм было получено 3250 пар изображений для различных положений робота и человека, данный набор данных используется для обучения нейронной сети. При этом 2500 элементов использовались для обучения, а 750 для валидации полученных результатов.

Особенностью данной задачи, является то, что сегментируемые объекты имеют крайне небольшую площадь, это приводит к тому, что использование стандартных функций расчета ошибки с большой вероятностью не выдаст необходимого результата. Поэтому в данном случае необходимо использование функции ошибки Дайса [5]:

$$D = \frac{2 \sum_i^N p_i g_i}{\sum_i^N p_i^2 + \sum_i^N g_i^2},$$

здесь p_i – предсказанное нейросетью значение для i -го пикселя, g_i – его необходимое значение, при этом значения пикселей принимают бинарный формат, либо 1 либо 0. Данная функция в отличие от остальных рассчитывается для всего изображения сразу и игнорирует значения нулевых пикселей, благодаря чему подходит для данной задачи.

Обучение проводилось при помощи библиотеки keras для языка программирования python. Всего для общего набора данных было проведено 18 эпох обучения, после чего были получены следующие метрики (рис. 6).

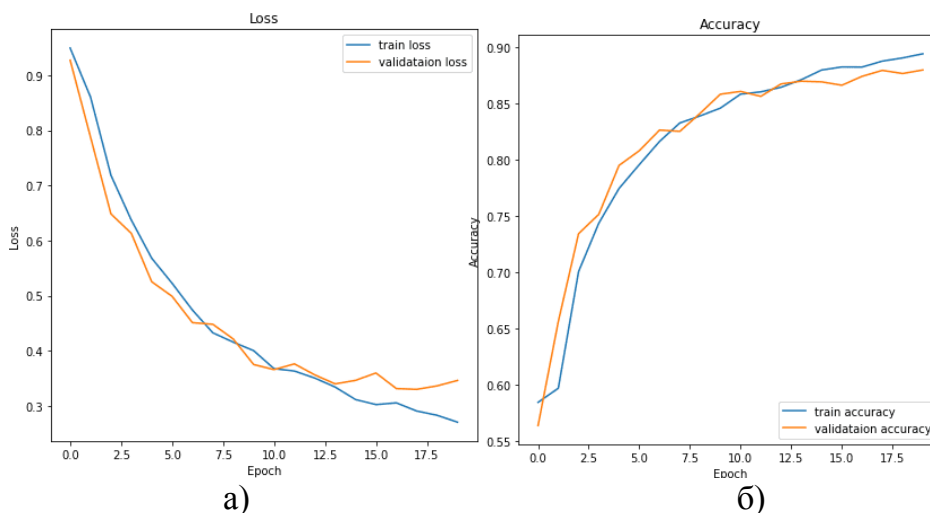
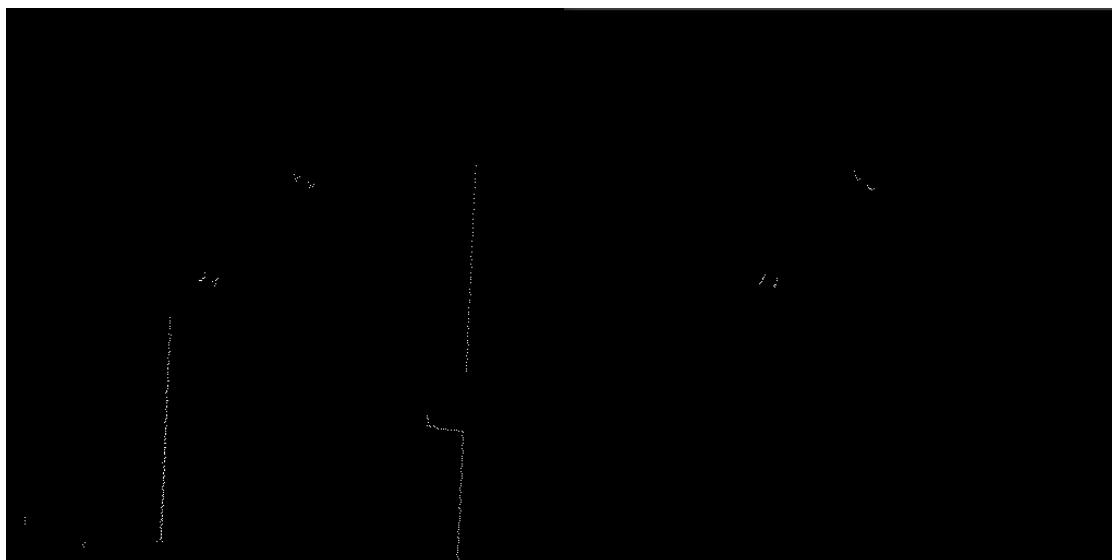


Рис. 6. Метрики, полученные во время обучения
(а – значения функции ошибки, б – оценка точности работы сети)

Значение функции ошибки после обучения – 0.2764, точность – 0.8831. При этом валидация также пройдена успешно. Данные значения точности считаются приемлемыми, поэтому считается, что обучение выполнено успешно.

Тестирование и доработка алгоритма. Тестирование нейросети было проведено в симуляции, при этом стоит отметить, что благодаря архитектуре сети, независимо от того сколько людей будет находиться в зоне видимости дальномера, все они будут отмечены на выходном изображении (рис. 7).



а) б)
Рис. 7. Вход и выход обученной нейросети
(а – входное изображение, б – выходное изображение)

Однако стоит отметить, что также случаются ложные срабатывания, так, например, срабатывания могут быть на короткие прямые объекты, а также на небольшие единичные группы пикселей, пример приведен на рис. 8.



Рис. 8. Ложные срабатывания на выходе нейросети

Здесь можно заметить, что нейросеть выделила небольшой угловатый объект, а также единичные группы пикселей. Также для детектирования человека можно использовать различные эвристические метрики, поэтому необходима реализация дополнительного фильтрующего блока.

Предлагается дополнительная фильтрация данных разбитая на два ключевых этапа:

1) выделение пар ног – это эвристическая метрика, которая позволит строить предположения о том, что конкретные белые пятна — это человек, с более высоким качеством;

2) скользящий фильтр – простой фильтр, который позволит отсеять большинство ложных срабатываний алгоритма.

Обобщенный вид первого этапа алгоритма представлен в виде блок-схемы на рис. 9.

Здесь все операции с изображением проводятся при помощи библиотеки OpenCV для языка python.

Удаление единичных белых пикселей производится при помощи операции свертки изображения. При этом ядро свертки выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix},$$

то есть является матрицей с единичными элементами размерностью 3 на 3, при этом если результат свертки меньше 0.2, то вся область свертки заполняется нулевыми значениями, в обратном случае область изображения под ядром не изменяется. Шаг свертки в данном случае является единичным, так как нельзя допустить уменьшения размерности изображения.



Рис. 9. Блок-схема алгоритма выделения пар ног

Удаление прямых линий осуществляется при помощи детектора линий Хафа [6], при этом минимальна длина линии – 5 пикселей. Если линия задетектирована, то она и вся область вокруг нее размером 3 пикселя удаляются. Стоит отметить, что так как ноги человека на изображении зачастую имеют полукруглую форму они удалены не будут.

Расширение оставшихся пикселей также производится за счет свертки, метод аналогичен удалению единичных пикселей за исключением того, что, если результат свертки больше 0 вся область закрашивается белыми пикселями.

Выделение контуров на бинарном изображении описано в статье [7], также дополнительно выполняется проверка соотношений сторон минимального прямоугольника, в который данный контур можно вписать. Если соотношение сторон более 0.5, то данный контур можно считать ногой человека. Данный параметр выведен эмпирически в ходе экспериментов.

Таким образом если на одном изображении после фильтрации находится два контура расстояние между которыми менее 0.4 метров, то координаты середины линии, соединяющей эти два контура, заносятся в массив скользящего фильтра

Алгоритм фильтрации скользящим фильтром представлен на рис. 10.

При этом частота лидара 10 Гц, время исполнения одной итерации алгоритма на вычислителе, установленном на тестовом роботе – 0.04 с, таким образом общее максимальное время выполнения одной итерации:

$$t_{max} = 0.15 \text{ с.}$$

Тогда максимальное выполнение двух итераций: $t_3 = 0.15 * 2 = 0.3 \text{ с.}$ Расстояние, которое человек, идущий с максимальной допустимой скоростью пройдет за заданное время:

$$d = t_3 * V_{max} = 0.3 * 2 = 0.6 \text{ м.}$$

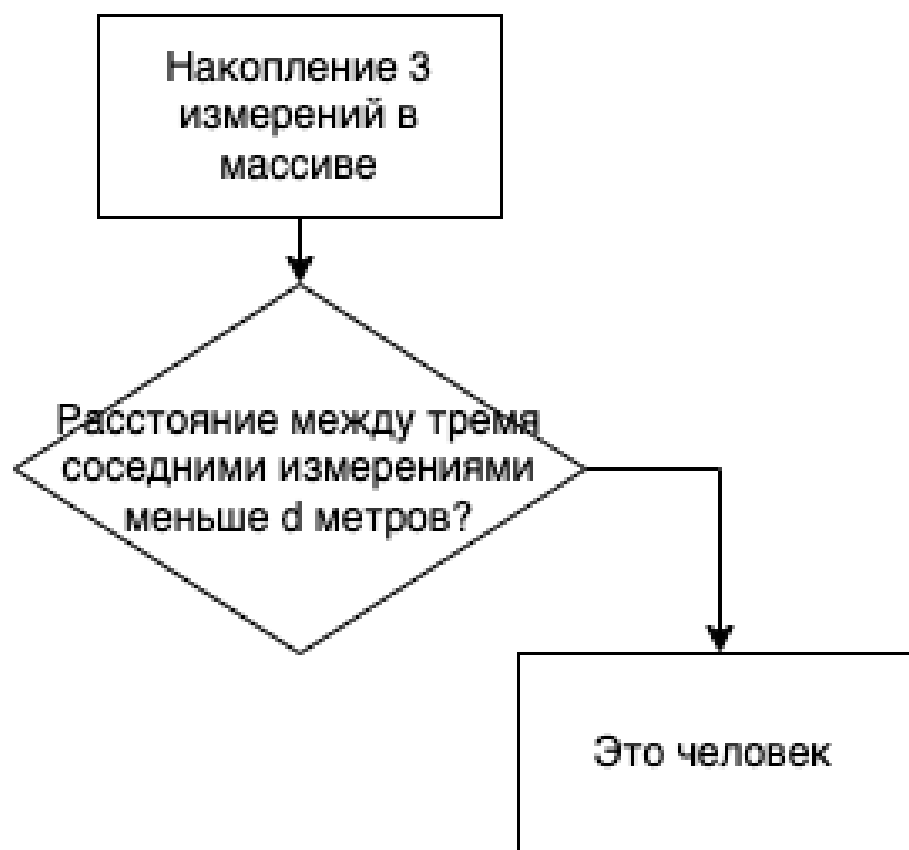
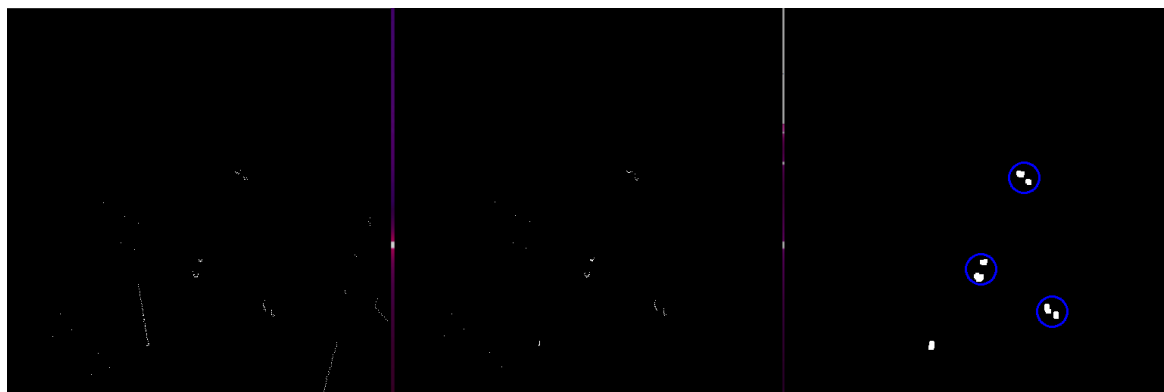


Рис. 10. Алгоритм фильтрации скользящим фильтром

Также необходимо учесть возможную погрешность измерения и детектирования, тогда примем $d = 0.7 \text{ м.}$

Таким образом результат работы разработанного фильтра, можно увидеть на рис. 11.



а) б) в)

Рис. 11. Результат работы разработанного фильтра (а – исходное изображение, б – вывод нейросети, в – изображение после фильтрации)

На отфильтрованном изображении (рис. 11в), задетектированные люди выделены синими окружностями. Можно также заметить, что после фильтрации в правой части изображения остался артефакт, однако благодаря дополнительно введенным эвристикам он не повлиял на результат работы алгоритма

Также было проведено тестирование на реальном роботе, оснащенном дальномером Noikuo URG-04LX. Пример результатов тестирования можно увидеть на рис. 12. Испытания проводились в различных помещениях и при различном количестве подвижных объектов. Во время испытаний было выявлено:

- если какой-либо элемент окружения в достаточной мере похож на ноги человека возможно появление ложного срабатывания;
- точность детектирования составила 93.4 % – при этом точность рассчитана, исходя из времени нахождения человека в радиусе работы дальномера и времени его детектирования.



а) б) в)



г)

Рис. 12. Работа алгоритма при использовании реального АСР (а – детектирование после фильтрации, б – показания датчика, в – вывод нейросети, г – окружение)

Заключение. В ходе работы был реализован алгоритм детектирования людей при помощи показаний лазерного датчика. Качество работы алгоритма было протестировано в симуляционной модели, а также на реальном оборудовании. По результатам тестирования можно сделать вывод о том, что алгоритм работает приемлемо, однако есть ряд особенностей, работа над устранением которых будет продолжена в дальнейшем:

- повышение частоты работы алгоритма, оптимизация для применения на реальном мобильном роботе;
- проведение полномасштабного тестирования алгоритма в различных средах и при различном количестве людей;
- интеграция алгоритма в существующую навигационную систему.

Библиографический список

1. Аналитический обзор мирового рынка робототехники [Электронный ресурс]. – URL: https://www.sberbank.ru/common/img/uploaded/pdf/sberbank_robotics_review_2019_17.07.2019_m.pdf.
2. Arras, K.O. Range-based people detection and tracking for socially enabled service robots / K.O. Arras, B. Lau, S. Grzonka, M. Luber, O.M. Mozos, D. Meyer // Towards Service Robots for Everyday Environments. –2012. – Vol. 76. P. 235–280.
3. Long, J. Fully convolutional networks for semantic segmentation / J. Long, E. Shelhamer, T. Darrell // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). –IEEE, 2011. – P. 3431–3440.
4. Ronneberger, O. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox// Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI). –2015. – Vol. 9351. – P.234–241.

5. Li, X. Dice Loss for Data-imbalanced NLP Tasks/ X. Li, X. Sun, Y. Meng, J. Liang, F. Wu, J.Li// 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. –2015. – Vol.1. – P. 465-476.
6. Shehata, A. A survey on hough transform, theory, techniques and applications/ A. Shehata, Sh. Mohammad, M. Abdallah, M. Ragab// International Journal of Computer Science Issues. –2015. – Vol.12, No 2, – P. 139–155.
7. Hossen, M. K. Application of Python-OpenCV to detect contour of shapes and colour of a real image / M. K. Hossen, S.M. Bari, P.P. Barman, R. Roy, P.K. Das // International Journal of Novel Research in Computer Science and Software Engineering. –2022. – Vol. 9. – P.20–25.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ПРИ ПРОГНОЗНОМ УПРАВЛЕНИИ ГОРОДСКОЙ СЕТЬЮ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Р.Ю. Банников, Г.В. Нетбай, В.Д. Онискив, В.Ю. Столбов

Рассматриваются необходимость и польза внедрения цифровых технологий в ТЭК. В качестве примера цифровизации приведено использование нейросетевой модели для предсказания температурных режимов теплоносителя на выходе из котельной согласно прогнозным данным по температуре окружающей среды, обеспечивающих нормативную температуру теплоносителя на входе к каждому потребителю тепла. Рассмотрены основные особенности при использовании нейросети, которые выявлены в ходе ее апробации на конкретной городской сети теплоснабжения.

Ключевые слова: теплосеть, прогнозное управление, инженерная система теплоснабжения, безмодельное оптимальное управление, управление температурой котла, нейросеть.

Тепловое потребление – одна из основных статей топливно-энергетического баланса нашей страны. В течение длительного периода тепловое хозяйство России развивается по пути концентрации тепловых нагрузок, централизации теплоснабжения и комбинированной выработки тепловой и электрической энергии. Широкое развитие получила теплофикация, являющаяся наиболее рациональным методом использования топливных ресурсов для тепло- и электроснабжения.

Для реализации теплофикации необходимо иметь тепловой источник на станции; разветвленную тепловую сеть в виде теплоизолированных теплопроводов, обеспечивающих доставку теплоносителя абонентам; тепловые пункты, готовящие для потребителей с помощью сетевой воды (пара) теплоноситель необходимых параметров, и собственно оборудование абонентов, использующее горячую воду (пар) в системах отопления, горячего водоснабжения (ГВС), вентиляции, кондиционирования воздуха и в технологических установках [1].

Цифровизация – это инновационное использование информационных и коммуникационных технологий, в частности широкомасштабное внедрение интеллектуальных устройств и датчиков, а также использование сбора и анализа больших объемов данных.

Опрошенные «РИА Новости» эксперты отмечают следующие положительные моменты цифровизации для теплоснабжающей отрасли [2]. Сибирская генерирующая компания (СГК) считает, что внедрение

цифровых технологий в ТЭК делает его более энергоэффективным и позволит ежегодно экономить миллиарды рублей. «Цифровая трансформация ТЭК позволяет в короткие сроки добиваться решения многих актуальных задач в этой сфере. Прежде всего, это повышает эффективность операционной деятельности за счет применения современных технологий сбора и обработки данных», – отмечает компания.

«Применяя технологии цифровых двойников в управлении режимами работы оборудования и сетей теплоснабжения можно добиться снижения доходящих до 40% сверхнормативных потерь, и сэкономить тем самым от 3% до 15% сжигаемого топлива. Кроме того, внедрение предиктивной аналитики в производственных процессах обладает потенциалом снижения затрат еще на 10-20%», — отмечает старший консультант VYGON Consulting.

«Т Плюс» и СГК отмечают, что в реальном времени смогут знать, в каком состоянии находится инфраструктура, какой потребитель сколько на себя «забирает», что позволит автоматически устранять «перетопы» и «недотопы». Потребитель получит комфортный температурный режим – регулировать поступление теплоносителя можно будет в автоматическом режиме, благодаря погодозависимой технике, а точный учет потребления позволит получить выгоду от энергоэффективных мероприятий.

Таким образом, можно говорить о том, что цифровизация позволяет дистанционно собирать большие объемы информации для последующего анализа, снижать издержки на подогрев теплоносителя, автоматизировать процесс контроля и поддержки комфортной температуры для конечных потребителей. Грамотное внедрение приводит к выгоде и пользе как для теплоснабжающих организаций, так и для конечных потребителей.

Ранее была построена нейросетевая модель сети теплоснабжения и опробована на статистических данные, снимаемых с установленных приборов учета в рамках автоматизированной системы управления «Аурога. Тепловой баланс в ЖКХ», функционирующей на территории гор. Лысьва Пермского края в период отопительного сезона 2018/19 года [3,4]. В результате были сделаны следующие выводы:

1) нейросетевое управление позволяет быстрее реагировать на изменение температуры воздуха путем корректировки температуры на выходе из котельной, обеспечивая температуры теплоносителя на входе к потребителю, близкие к нормативным значениям;

2) предсказанные нейросетью значения температуры бойлера в большинстве моментов времени находятся ниже значений, установленных оператором в ручном режиме. Это связано с тем, что оператор, перестраховываясь, часто завышает температуру на выходе из котельной, так как не может точно оценить влияние прогнозных значений

температуры воздуха на температуру теплоносителя, поступающего в дома;

3) внедрение нейросетевого управления позволит повысить эффективность теплоснабжения.

Следующим шагом было апробация построенной нейросетевой модели на теплосети большего масштаба: теплоснабжающая сеть города Чернушка Пермского края. Период проведения тестовой эксплуатации: отопительный сезон 2021/2022 года.

Первоначально нейросеть была обучена на выборке данных с приборов учета, снимаемых с 30 ноября 2021 года по 30 декабря 2021 года. Обучающее множество было выбрано на временном интервале с 30 ноября 2021 года по 23 декабря 2021 года, тестовое – с 23 декабря 2021 года по 30 декабря 2021 года. В тестовой выборке участвовало 9 многоквартирных домов (МКД), территориально располагающихся в разных районах и на разных расстояниях. Обученная нейросеть для большинства МКД в должной степени достоверно продемонстрировала корреляцию между температурой теплоносителя на выходе из котельной и температурой на входе в МКД (рис. 1).

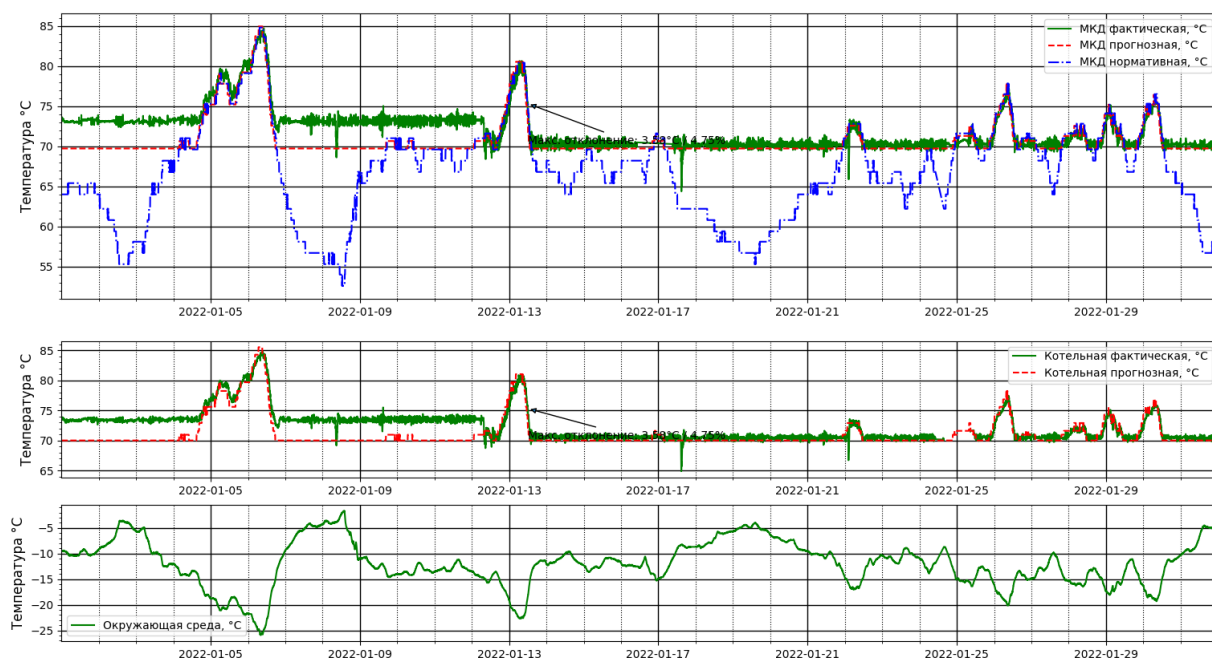


Рис. 1. Пример удачного обучения нейронной сети

Однако, для одного МКД обученная нейросеть показала неверную корреляцию между температурой теплоносителя, на выходе из котельной, и температурой на входе в МКД (рис. 2). Анализ данных обучающего множества показал, что часть данных с временного интервала обучающего множества отсутствовала (рис. 3). Следовательно, объем обучающего

множества был очень мал для качественного обучения нейронной сети по данному МКД.

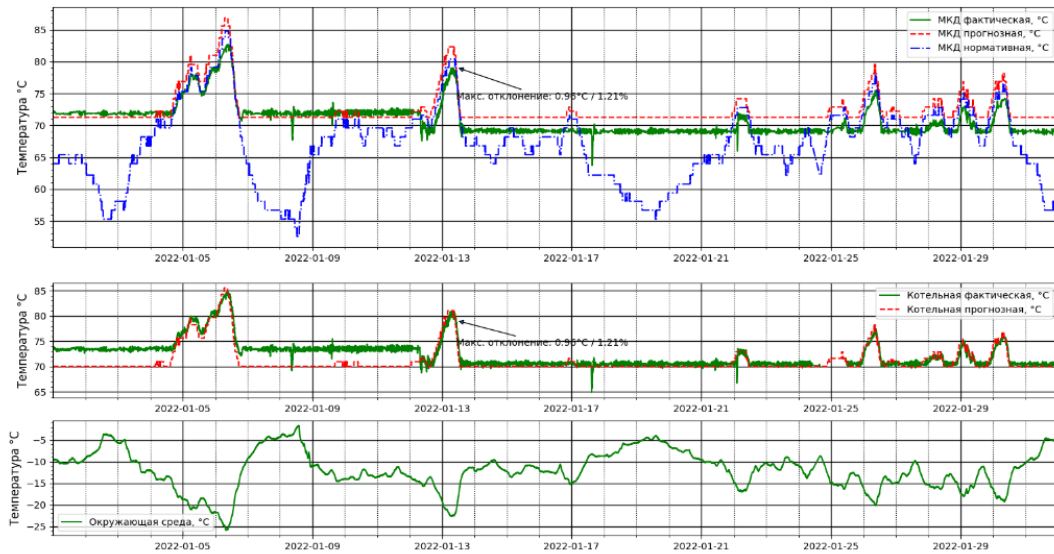


Рис. 2. Пример неудачного обучения нейронной сети, малый объем обучающего множества

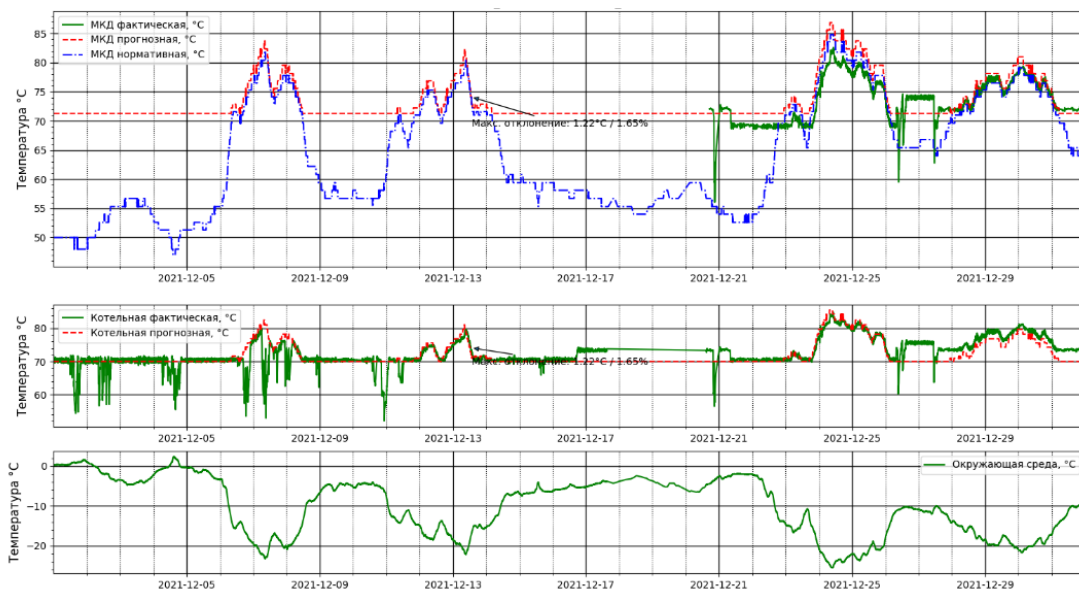


Рис. 3. Неполнота данных из временного интервала обучающего множества

Следующей особенностью, с которой пришлось столкнуться, оказалось уменьшение степени корреляции температур в длительном временном интервале. На рис. 4 можно наблюдать расхождение по температуре на входе в МКД в начале представленного временного интервала (февраль 2022) и в конце при одинаковых температурах теплоносителя на выходе из котельной.

Изменения корректности работы не существенные, ошибка составляет порядка 1°C. Выявленные изменения в корректности работы обученной

нейросети, предположительно, связаны с изменением гидродинамических характеристик рассматриваемой теплосети.

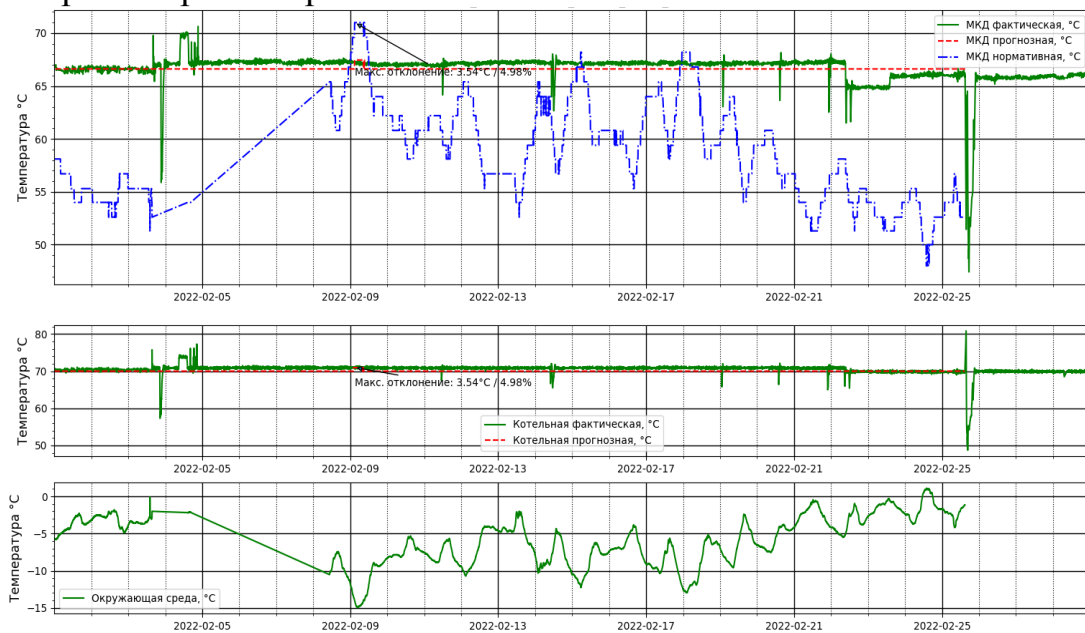


Рис. 4. Уменьшение корректности работы нейросети со временем

Было принято решение о переобучение нейросетевой модели на более близких по времени данных, чтобы было учтено более близкое к рассматриваемому временному интервалу состояние городской сети теплоснабжения. Переобучение нейросетевой модели на данных января месяца (обучающее множество – с 1 января 2022 года по 23 января 2022 года, тестовое – с 23 января 2022 года по 1 февраля 2021 года.) изменило ее характеристики, уменьшив ошибку в прогнозных данных (рис. 5).

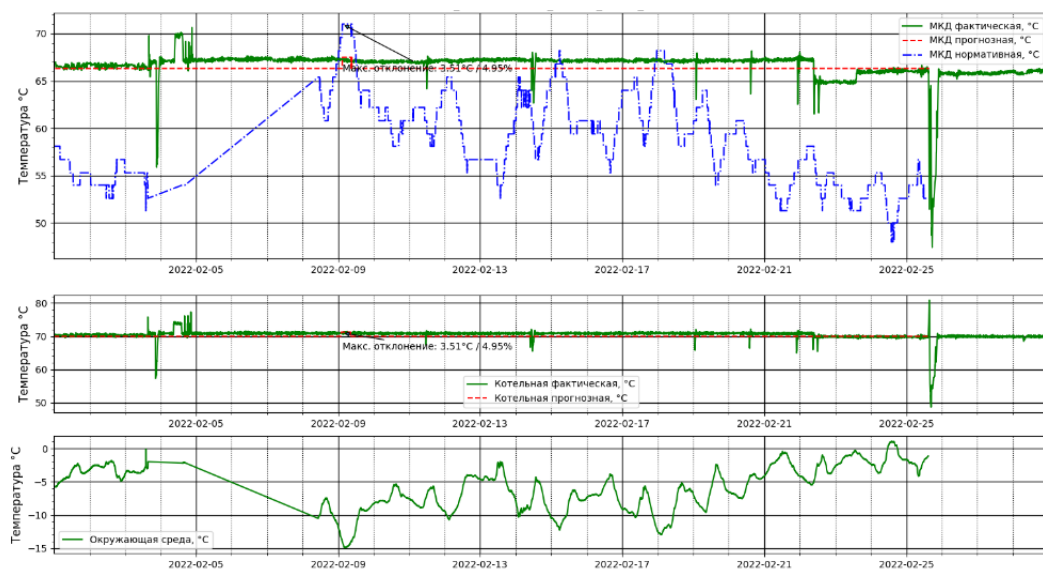


Рис. 5. Результат работы нейросети после переобучения

Также были замечены незначительные отклонения (менее 1 °С) при обучении нейросетевой модели на данных, охватывающих погодный температурный диапазон, для которого в дальнейшем применялась обученная нейросеть, и на данных, охватывающих меньший температурный диапазон.

Заключение. Внедрение цифровых технологий в ТЭК безусловно имеет положительную тенденцию, но не стоит забывать, что внедрение любого информационного продукта связано с определенными особенностями. Апробация нейросетевой модели, как раз и выявило часть из них. Согласно проведенным исследованиям, можно говорить о следующем:

1) теплосеть является «живым организмом», у которого со временем меняются гидродинамические характеристики. Это может быть связано как с износом самой теплосети, так и с проведенным плановыми и внеплановыми работами на теплосети и котельной. Поэтому необходимо периодическое переобучение нейронной сети;

2) важными моментами, на которые стоит обратить внимание при переобучении, являются: объем данных обучающего множества и диапазон изменения значений температуры окружающей среды на выбранном обучающем множестве;

3) при управлении теплоснабжением города с помощью нейросети необходимо автоматически ее дообучать (или переобучать) через заданный период времени, добавляя новые данные. При этом желательно учитывать техническое состояние теплосети и возможное изменение температурных режимов.

Библиографический список

1. Вафин, Д.Б. Теплоснабжение и тепловые сети: учебное пособие / Д.Б. Вафин. – Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2014. – 228 с.

2. Цифровизация в теплоснабжении поможет сэкономить и уменьшить число аварий [Электронный ресурс]: <https://finance.rambler.ru/other/43358259/> (дата обращения: 29.07.2022).

3. Нетбай, Г.В. Прогнозное управление локальной городской системой теплоснабжения на основе нейросетевого моделирования / Г.В. Нетбай, В.Д. Онискив, В.Ю. Столбов, Р.Р. Каримов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2020. – Т.20, № 3. – С.29–38.

4. Банников, Р.Ю. Нейросетевое управление городской системой теплоснабжения с учетом прогнозных данных / Р. Ю. Банников, Г. В. Нетбай, В. Д. Онискив, В. Ю. Столбов // Управление большими системами: труды XVII Всерос. школы-конференции молодых ученых (6–9 сент. 2021 г., Москва - Звенигород). – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 167–177.

ОРГАНИЗАЦИЯ ХРАНЕНИЯ И ПОИСКА ИНФОРМАЦИИ О СВОЙСТВАХ АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ МАТЕРИАЛОВ

А.Е. Беляков, О.С. Бородина, Е.В. Барташевич, Д.В. Топольский

Мировой опыт агрегации и хранения информации о свойствах химических соединений и материалов, основанный на создании специализированных баз данных, показывает возможности их использования в технологии цифрового двойника материала, что способствует снижению рисков при внедрении инноваций. В многомасштабном моделировании материалов средствами вычислительных программ применяются технологии больших систем. Для хранения, анализа и поиска информации об атомно-молекулярных системах используется хранилище больших данных, организованное по принципу озера данных.

Ключевые слова: цифровой двойник материалов, многомасштабное моделирование, озеро данных, полнотекстовый поиск, большие данные, распределенные вычисления.

Разработка цифровых двойников материалов – задача, отвечающая вызовам нашего времени. Цифровые двойники позволяют моделировать применение новых материалов и конструкций, выявлять экономические и экологические риски при внедрении инноваций, еще на этапе проектирования [1]. Отметим, что оптимальный выбор материала при проектировании продукта является важнейшим вопросом при реализации устойчивого производства [2]. Технология цифрового двойника может учитывать поведение изделия при нагрузках и оптимизировать процессы, связанные с их изготовлением и эксплуатацией, вплоть до отдельных компонентов материалов. Современные достижения в области цифровых и сенсорных технологий позволяют объектам *in silico* сосуществовать вместе со своими физическими аналогами [3, 4].

В основном, цифровые двойники используются при оценке производительности сложных инженерных систем или их компонентов, где основное внимание уделяется точному описанию макромасштабной геометрии и показателей производительности на уровне компонентов. Например, существует быстрый способ создания цифрового двойника композитного материала, учитывающего диаметр, ориентацию и длину волокна. Происходит расчет механических свойств и сравнение результатов с данными, полученными путем микроскопии [5]. Но такие решения из-за высокой дисперсии свойств образцов могут стать очень сложными, что может индуцировать нарушения или приводить к

снижению пропускной способности и росту затрат. Эту проблему можно решить, если принимать во внимание физическое взаимодействие между образцами и системами обработки материалов [6].

Цифровые двойники в индустрии на данный момент не используют в полной мере описание и архивирование данных о материалах, которые связаны с явлениями, происходящими на уровне атомно-молекулярных систем. Этот разрыв объясним разрозненным характером текущих исследований свойств материалов и свойств химических соединений и устойчивости в коммуникации сообществ по разработке продуктов. Тем не менее, очевидно, что успешное расширение цифровых двойников включением информации о свойствах материалов ведет к целостному проектированию производственного процесса в полностью интегрированных инновационных циклах.

Материалы, сами по себе, представляют собой сложные многомасштабные и физические системы. Область материаловедения и инженерии фокусируется на понимании того, как различные режимы обработки влияют на структуру материала и связанные с ней свойства. Понимание и точная количественная оценка базовых взаимосвязей «процесс – структура – свойство» довольно трудная задача, потому что различные физические явления, происходящие в разных масштабах, связаны и зависимы друг от друга. Задача применения системного подхода, охватывающего весь спектр масштабов материалов, сталкивается со многими препятствиями. Наиболее значительным из этих препятствий является тот факт, что данные единой системы генерируются опосредованно разными группами исследователей, имеющих специфический опыт. Например, экспериментальные данные о материалах поступают из оптической микроскопии, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии, различных дифракционных и спектроскопических методов, рентгеновской томографии, атомно-силовой микроскопии. Оценка свойств, например, производится с помощью механических испытаний в различных режимах и при различных пространственных разрешениях, теплопроводности, диффузии. Данные моделирования поступают из источников, нацеленных на точное описание химической структуры или конкретных физико-химических явлений: вычисления теории функционала плотности, молекулярная динамика, конечно-элементные модели. Каждый отдельный набор данных дает только часть представлений, и только системный подход может обеспечить целостное представление, необходимое для объективного ускорения инноваций в области материаловедения [7]. Это действительно является целью многих национальных и международных инициатив по исследованию материалов, таких как ICME и MGI.

Агрегация информации о свойствах веществ решается путем создания специализированных баз данных химических соединений и материалов. Такие базы данных, как NOMAD [8] и OMDb [9] предоставляют анализ электронных и магнитных свойств соединений, рассчитанных одним методом, так, чтобы их можно было сопоставлять, а также использовать данные для машинного обучения в целях предсказания свойств новых соединений. Веб-интерфейс OMDb позволяет пользователям искать материалы с заданными целевыми свойствами, используя запросы об их электронной структуре, включая передовые инструменты для распознавания образов, поиска химических и физических свойств [10]. Структурная информация для базы данных OMDb берется из открытой кристаллографической базы данных CCSD [11]. Расчеты структуры химического соединения выполняются в рамках теории функционала плотности DFT с использованием периодических волновых функций, несущих информацию об электронном строении, что реализовано в программе VASP [12].

С другой стороны, такие базы данных, как PubChem, агрегируют данные об одном соединении, полученные разными исследователями и методами. При разработке этой базы данных были решены вопросы сбора разных данных по одному веществу и идентификации вещества в различных файлах из различных источников за счет двухуровневой структуры: *Substance* и *Compound* [13]. В *Substance* хранятся в неизменном виде данные, поступающие из различных источников, далее информация об одном и том же веществе агрегируется в *Compound* с помощью автоматизированного процесса, извлекающего уникальные химические структуры из базы данных *Substance* для создания базы данных *Compound*. Таким образом, PubChem стандартизирует информацию из *Substance*, для того, чтобы сравнить структуры, для которых есть записи, и объединить записи об одной структуре. Процесс стандартизации информации включает 2 этапа: валидацию и нормализацию. Сопоставление веществ с записями в базе данных *Compound* производится на основе структурных хэш-кодов, рассчитанных для стандартизированных структур [14].

В многомасштабном моделировании химических соединений и материалов применяются технологии больших систем, когда комбинаторно велико или несчетно число состояний моделей на разных масштабах, а также взаимосвязей между ними. Возникают задачи сбора, анализа и хранения огромных объемов данных (Big data), полученных в результате различных экспериментов и теоретических расчетов. Актуальна задача поиска информации по наколенным данным из различных и независимых друг от друга источников для формирования целостного представления о многомасштабных моделях материалов.

В качестве исходных данных используются файлы готовых цифровых моделей молекулярных кристаллов, полученных в программе CRYSTAL, файлы, полученные средствами рентгенодифракционного эксперимента и методами моделирования. Файлы имеют либо текстовый слабоструктурированный, либо бинарный формат представления информации. Для решения задачи хранения и обработки больших объемов слабоструктурированной информации применяют программно-аппаратные решения облачного или локального размещения в организации, называемые озерами данных (Data Lake) [15]. Информация, попадая в реляционные и не реляционные системы хранения, проходит путь ETL (Extract-Transform-Load). В озерах данных принят иной алгоритм, когда информация записывается без трансформации, но последняя применяется уже на этапе выборки, анализа и индексирования данных для поиска (ELT, Extract-Load-Transform) [16]. Архитектурный подход ELT позволяет организовать массивно-параллельную систему, оптимизированную под распределенную обработку больших объемов слабоструктурированных данных и балансировку нагрузки по одновременному потоковому сохранению информации с различных приборов химического анализа в озеро данных. Наиболее часто встречающийся подход к построению озер данных [15, 16], особенно локально размещенных (внутрикорпоративных, внутриуниверситетских) основан на применении экосистемы Apache Hadoop [17]. Неструктурированные данные хранятся в HDFS (Hadoop Distributed File System), технология MapReduce обеспечивает параллельную обработку данных.

Для решения задачи поиска была выполнена аннотация к файлам, определен глоссарий служебных и ключевых слов для систематизации химической информации. Проанализированы файлы форматов CRYSTAL17 OUT, PDB, CIF. В результате проделанной работы разработан прототип электронного паспорта химического соединения или материала, являющегося агрегатом разноплановых данных об одном объекте (рис. 1).

Для синтаксического анализа файлов и формирования расширяемой объектной модели электронного паспорта (JSON-структура) разработаны парсеры на основе открытых проектов: PDBeCIF [18] и NOMAD parser [19]. Структурированные и индексируемые для поиска данные электронных паспортов хранятся в экосистеме Apache Hadoop в модуле NoSQL-базы данных HBase, представляющей «семейство столбцов» с возможностью расширения в будущем количества хранимых атрибутов электронных паспортов. В качестве дополнительного инструмента полнотекстового поиска по исходным файлам озера данных, а также поиска по значениям атрибутов электронных паспортов применяется

поисковый движок Elasticsearch [20]. Архитектура озера данных цифровых двойников материалов представлена на рис. 2.

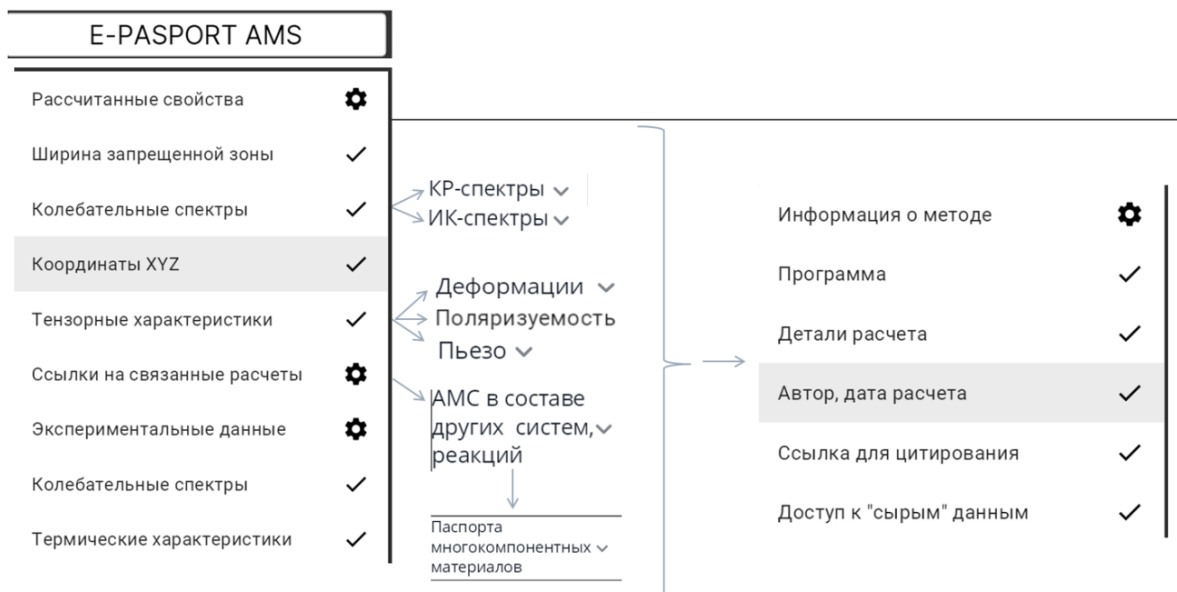


Рис. 1. Прототип электронного паспорта атомно-молекулярной системы (АМС) на примере объединения данных о структуре, рассчитанных и экспериментально измеренных свойствах и его реакционной способности

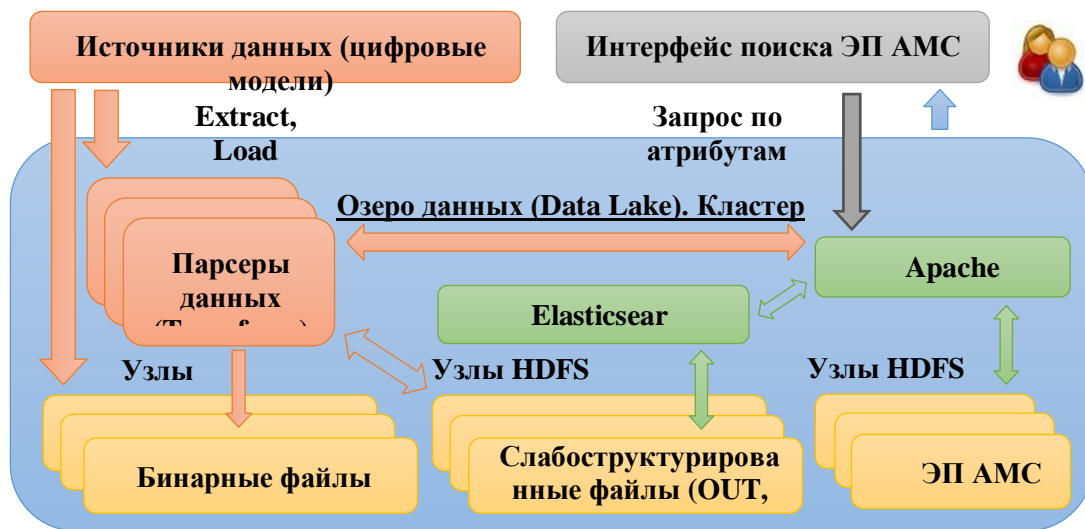


Рис. 2. Архитектура озера данных цифровых двойников материалов

Таким образом, экосистема Apache Hadoop создает необходимый фундамент по хранению и поиску различных по структуре, либо неструктурированных данных измерений и экспериментов, что в дальнейшем позволит разрабатывать алгоритмы по аналитике и

кластеризации методами искусственного интеллекта экспериментальных и расчетных данных, наполнять знаниями цифровые двойники материалов.

Информационный поиск при задании ключевых слов реализован по следующим группам:

1. Ключевым словам, относящимся к химической структуре АМС (рис. 3), которые задаются на этапе депонирования пользователем.

2. Методам расчета: на основе запроса к автоматически считанным из входных файлов ключевым словам, характеризующих расчет (рис. 4).

3. Экспериментальным и расчетным свойствам АМС (рис. 5) по типу свойства (спектры, ШЗЗ, тензоры, температура плавления и т.д.) и его величине (конкретно или в диапазоне, например, ШЗЗ = 3,2 эВ или от 3,0 до 3,5 эВ).

4.

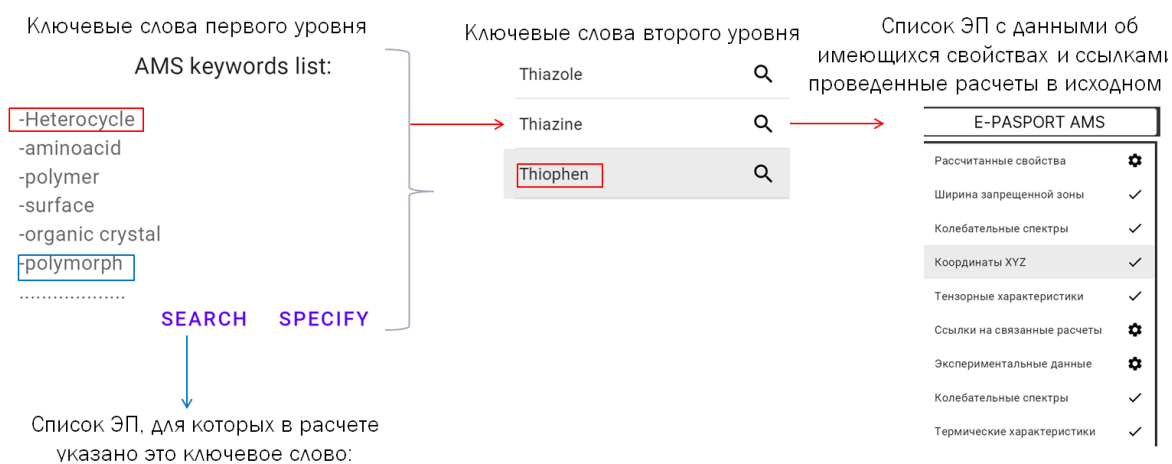


Рис. 3. Пример запроса к озеру данных, по ключевым словам, характеризующим объект

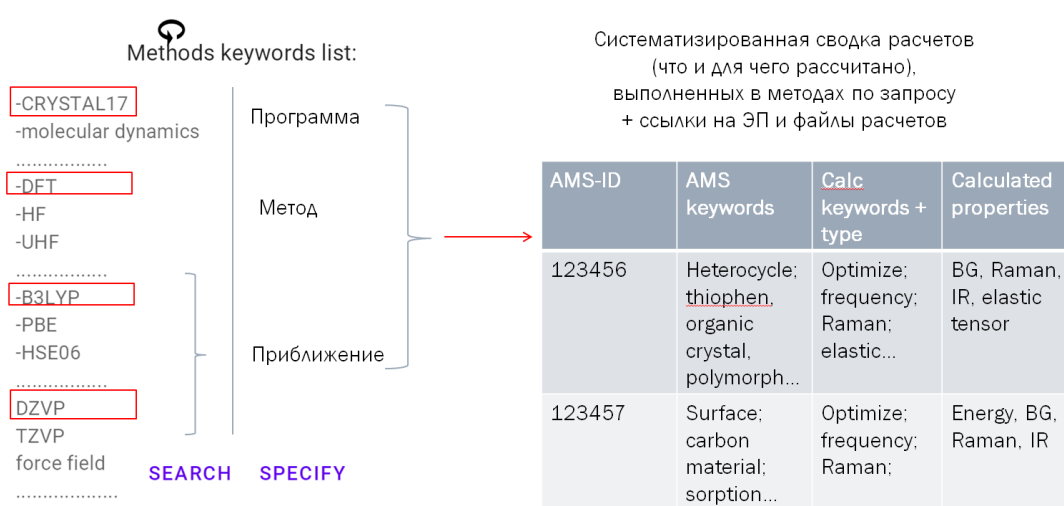


Рис. 4. Пример запроса к озеру данных по методам расчета

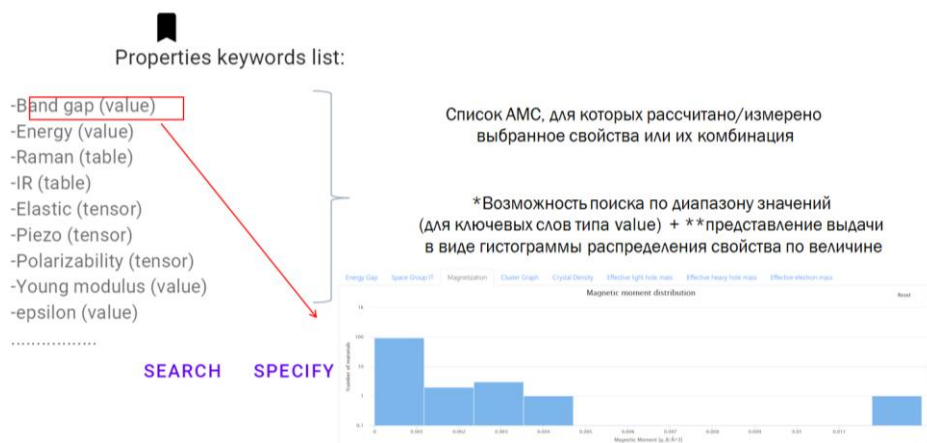


Рис. 5. Пример запроса к озеру данных по рассчитанным и экспериментальным свойствам

Заключение. В исследовании проанализирован мировой опыт обработки больших объемов информации о свойствах химических соединений и материалов. В качестве специализированной базы данных и экосистемы хранения и поиска неструктурированных и слабоструктурированных данных цифровых многомасштабных моделей сложных систем представлено озеро данных на основе технологий Apache Hadoop. Аккумулируя информацию из различных источников, электронный паспорт материала дает системное представление о его составе, структуре, рассчитанных и экспериментально измеренных свойствах, участии его в составе химических реакций, построенных моделях и закономерностях «структура-свойство».

Библиографический список

1. Ottinger N. B. et al. Digital twin: the Age of Aquarius in construction and real estate. – 2021.
2. Xiang F. et al. Digital twin driven green material optimal-selection towards sustainable manufacturing // *Procedia Cirp*. – 2019. – Т. 81. – С. 1290-1294. doi: 10.1016/j.procir.2019.04.015
3. Mei, H., Haider, M., Joseph, R., Migot, A., and Giurgiutiu, V. (2019). Recent Advances in Piezoelectric Wafer Active Sensors for Structural Health Monitoring Applications. *Sensors* 19 (2), 383. doi:10.3390/s19020383
4. Ullo, S. L., and Sinha, G. R. (2020). Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors. *Sensors* 20 (11), 3113. doi:10.3390/s20113113
5. Constantin Bauer, Math2Market GmbH. The Digital Twin – A comparative study of material simulation on μ CT-scanned and modelled microstructures / The 4th International Congress on 3D Material Science 2018

6. Glatt M. et al. Modeling and implementation of a digital twin of material flows based on physics simulation //Journal of Manufacturing Systems. – 2021. – Т. 58. – С. 231-245. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.04.015
7. Kalidindi Surya R., Buzzy Michael, Boyce Brad L., Dingreville Remi. Digital Twins for Materials / Frontiers in Materials, 9, 2022. doi: 10.3389/fmats.2022.818535
8. Novel Materials discovery project (NOMAD, <https://www.nomad-coe.eu>)
9. Organic Materials Database (OMDB, <https://omdb.mathub.io>)
10. S. S. Borysov et al., "Organic Materials Database: an Open-Access Online Database for Data Mining", PLOS ONE 12(2): e0171501 (2017).
11. Crystallography Open Database (COD, <http://www.crystallography.net>)
12. Borysov S. S., Geilhufe R. M., Balatsky A. V. Organic materials database: An open-access online database for data mining // PloS one. – 2017. – Т. 12. – №. 2. – С. e0171501. 10.1371/journal.pone.0171501
13. Kim S, Thiessen PA, Bolton EE, et al. PubChem Substance and Compound databases. Нуклеиновые кислоты Res. 2016; 44(D1): D 1202-D1213. doi:10.1093/nar/gkv951.
14. Ihlenfeldt W.D., Gasteiger J. Hash codes for the identification and classification of molecular-structure elements. J. Comput. Chem. 1994;15:793–813
15. Tomcy John, Pankaj Misra Data Lake for Enterprises. – 2017.
16. Pwint Phyu Khine¹, Zhao Shun Wang¹ Data lake: a new ideology in big data era: ITM Web of Conferences 17, 03025 (2018)
17. Highly Available Object Oriented Data Platform (HADOOP, <https://hadoop.apache.org>)
18. PDBeCIF: an open-source mmCIF/CIF parsing and processing package (<https://bmcbioinformatics.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12859-021-04271-9>)
19. NOMAD parser (<https://nomad-lab.eu/prod/rae/docs/parser.html>)
20. Elastic Stack project (<https://www.elastic.co/elasticsearch>)

РАЗРАБОТКА СРЕДЫ ДЛЯ БЫСТРОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ И ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ

О.В. Блинова, С.А. Цыникин

В статье рассмотрены результаты, перспективы развития и проблемы системы, разрабатываемой для быстрого проектирования сетей беспроводной связи на местности со сложным рельефом. Система предназначена для проектирования сетей связи с использованием готовых комплектов оборудования и неполным покрытием территории связью без привлечения профильных специалистов. Развитие и расширение возможностей системы поиска оптимальных мест расположения сетевых устройств приближает модель к реальным условиям, но сильно увеличивает вычислительную сложность и время решения задачи. Для сокращения времени работы с системой задачи следует разделить на несколько автономных этапов, большая часть которых может быть выполнена предварительно и сохранена в базе данных для дальнейшего использования.

Ключевые слова: беспроводные сети связи, временные сети связи, программное обеспечение для моделирования сетей, сети с неполным покрытием, сети связи на сложном рельефе.

Повседневное использование беспроводных сетей связи стало реальностью, но проектирование таких сетей остается сложной задачей, требующей специального оборудования, программного обеспечения, высокой квалификации сотрудников. Для многих задач бюджет, необходимый для проектирования сети, оказывается недопустимым. Это, в первую очередь, проектирование временных сетей, необходимых для обеспечения связью каких-либо мероприятий на местности, на которой связь отсутствует совсем или ее возможности недостаточны. Так же проекты для небольших частных хозяйств и ферм, которые не могут вложить крупные суммы для вызова специалистов, но нуждаются в использовании беспроводных сетей для координации работы или контроля за состоянием участка. Специализированные программные продукты в первую очередь ориентированы на проектирование офисных сетей и их использование на сложном рельефе при неполном покрытии территории сетью неэффективно, а покупка их не оправдана [1]. Создание инструмента для проектирования небольших и временных сетей помогло бы организаторам мероприятий в малонаселенных областях не отказываться от разворачивания сети связи и позволило бы найти доступные решения. Особенно это актуально для мероприятий, связанных с большим риском

для жизни. Наличие связи может иметь решающее значение для успеха спасательных работ при возникновении чрезвычайных происшествий[2].

Необходим универсальный инструмент, простой в использовании, но способный учесть большое разнообразие условий. Эффективным решением может быть подготовка и использование готовых комплектов оборудования, не требующих сложной настройки, и размещение их на местности в соответствии с требованиями. В таком случае задача сведется к поиску координат для размещения оборудования для обеспечения максимально доступного уровня связи или обеспечения связи в ключевых точках маршрута, например, на местах стоянок. Разнообразные условия можно учитывать путем добавления ограничений, весовых коэффициентов, настроек. Предполагается, что оборудования недостаточно для полного покрытия территории связью, поэтому при решении задачи размещения используется привязка к маршрутам абонентов. Подробнее система рассмотрена в работах [3, 4]

В разработанном программном продукте выделяются несколько стадий проектирования сети.

1. Создание трехмерного рельефа. Сложный рельеф местности может сильно изменять распространение сигнала на местности. Разработанный модуль позволяет создать 3D рельеф на основе изображения, карты или схемы. Существуют готовые решения для создания 3d рельефа, но они сложны в освоении, защищены авторскими правами и ориентированы на профессиональную работу, требующую времени и квалификации [5, 6, 7]. Анализ карт по цветовому признаку часто приводит к ошибкам в связи с разметкой на картах. Для их корректировки создан простой редактор. Есть возможность изменять степень детализации. Сгенерированные рельефы можно сохранять, а это значит, что есть возможность заранее оцифровать местность проведения мероприятия или другие имеющиеся карты и схемы, подготовив таким образом почву для дальнейшего моделирования. Необходимо связывать 3D рельеф с исходным изображением и организовать возможность поиска рельефов по этому параметру. По одному изображению можно построить несколько рельефов с разной степенью детализации или с разными легендами. Легенды тоже можно сохранять, создавая некоторый стандарт для обработки карт.

2. Размещение на рельефе маршрутов движения абонентов. На некоторых участках местности допустимые маршруты могут быть известны заранее – тропы, дороги, известные спортивные маршруты и т.д. Можно создать их на карте с помощью редактора, сохранить, а потом удалять все, кроме необходимых в конкретной задаче. Таким образом можно задать точные координаты. Приоритеты узлов и точек так же можно сохранить.

3. Добавление и сохранение характеристик оборудования, доступного к использованию. Каждый вид оборудования сохраняется в отдельном файле с указанием необходимых характеристик и может использоваться многократно. Это удобно, особенно при акцентировании на использовании готовых комплектов. Хранение информации об оборудовании требует тщательного продумывания для определения и необходимых параметров и возможности поиска по совместимости устройств или комплектов. На рис. 1 представлен интерфейс добавления и настройки сетевых устройств.

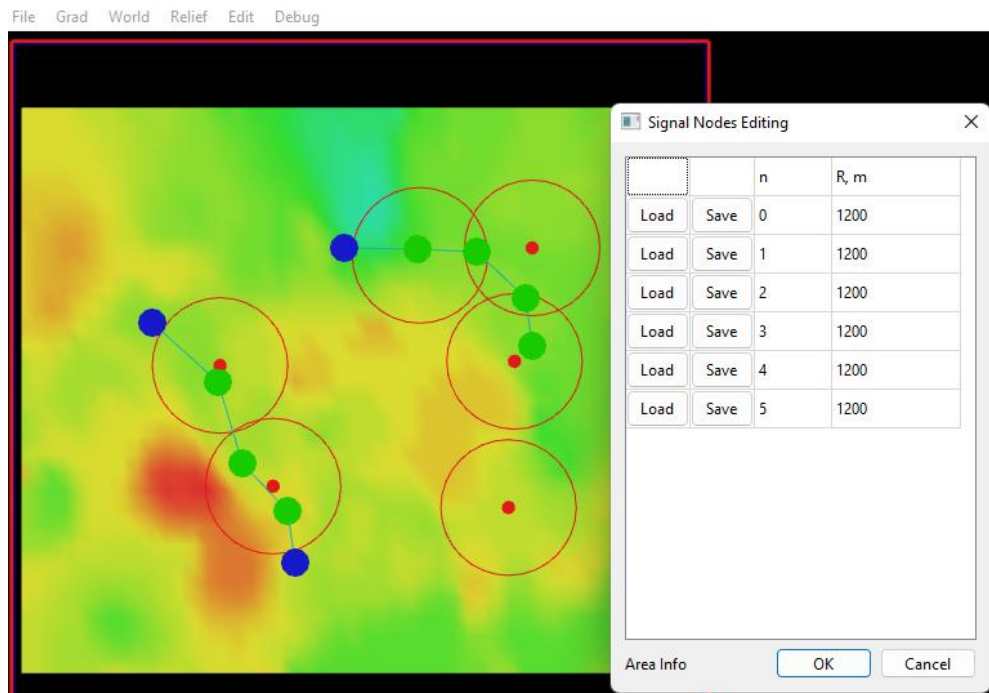


Рис.1. Добавление сетевых устройств в конфигурации

4. Исследование подготовленных конфигураций на уровень доступа к сети абонентов с учетом рельефа местности и, при необходимости, с учетом скоростей перемещения по траекториями. Целевая задача, решаемая системой, это поиск оптимальных мест расположения устройств. Но в практических целях иногда имеет смысл просто исследовать какую-то конкретную конфигурацию. Например, уже известны места с возможностью доступа к сети и надо понимать обеспечиваемый при этом уровень связи. Или подвинуть устройство в более удобное для размещения место и оценить изменения уровня сигнала. Иногда возможные места для размещения оборудования сильно ограничены другими условиями. Можно исследовать все характеристики конфигурации, не прибегая к работе оптимизационного алгоритма.

5. Поиск оптимальных мест размещения сетевых устройств и анализ обеспечиваемого уровня доступа [8]. Завершающим этапом является запуск оптимизационного алгоритма. Конфигурации сортируются в

соответствии с получаемым уровнем доступа. Результаты моделирования заносятся в таблицы, которые могут быть перенесены в процессор электронных таблиц для последующей обработки и визуализации результатов. На рис. 2 представлен интерфейс для анализа обеспечиваемого уровня доступа в конкретном решении с учетом скорости движения абонентов и времени от начала их движения.

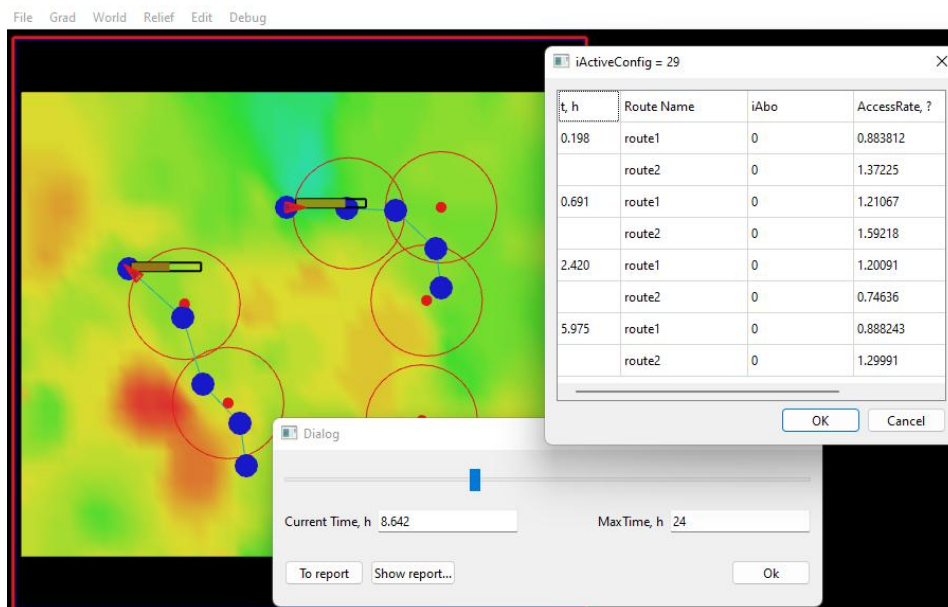


Рис. 2. Исследование уровня доступа для полученной конфигурации с учетом скоростей движения абонентов и формирование отчета

Проведенные эксперименты показали, что процесс последовательного прохождения всех стадий проектирования сети требует значительного времени, которое нецелесообразно тратить при возникновении чрезвычайного происшествия. Например, чаще всего рельефы и карты требуют ручной корректировки. Плюс программный продукт с развитием становится более ресурсоемким в плане вычислительной сложности. Но часть задач возможно сделать предварительно и, самое главное, использовать повторно. Группы,двигающиеся по маршруту, могут использовать результаты моделирования другой группы, прошедшей этот маршрут ранее. В системе реализовано сохранение рельефов, конфигураций маршрутов на рельефе, количества сетевых устройств и их характеристик. Для ускорения и упрощения работы с системой необходимо решить ряд задач:

- создание единого пространства для общения и обмена опытом заинтересованных лиц;
- поиск возможности реализации разработанной системы в виде интернет сервиса;
- проектирование базы данных для хранения уже созданных рельефов,

конфигураций, оборудования, опыта использования;

- разработка более простого интерфейса программного модуля и хорошей документации;

- результаты моделирования должны быть испытаны на местности и должно быть возможно введение ограничений и поправок по результатам натурных испытаний.

Суммируя, разрабатываемый программный продукт может нести практическую ценность в первую очередь если он станет частью среды и сообщества пользователей, заинтересованных в использовании беспроводных сетей в рассматриваемом круге задач и анализе полученных результатов. Поскольку весь проект ориентирован на проектирование в первую очередь временных сетей необходима возможность рассмотрения доступных для аренды готовых комплектов оборудования, создания сервиса аренды оборудования. Разработанный программный продукт является достаточно требовательным к вычислительным мощностям. Его текущая реализация не позволяет без переработки предоставить его как интернет сервис, и создан скорее как научный и экспериментальный проект, а не как решение, готовое для массового тиражирования. Для активного подключения сообщества необходимо переработать программный продукт с учетом возможности встраивания в единую среду интернет-портала для обобщения опыта и сбора информации, необходимо продумывание архитектуры данной среды для организации хранения данных не только самого проекта, но и пользовательского опыта и удобного доступа к этим данным [9,10]. Целевой аудиторией, в первую очередь, являются группы туристов, спортсменов, альпинистов, научно-исследовательские экспедиции, спасатели, работающие в малонаселенных районах. Разрабатываемая среда может быть полезна при проектировании сетей связи для фермерских хозяйств, небольших мануфактур, сельскохозяйственных угодий, частных домов и т.д. Есть перспективы применения в системах охраны, видеонаблюдения, умных домов и т.д.

Заключение. Программная среда для проектирования временных сетей на сложном рельефе показывает хорошие и практически ценные результаты. Но текущий формат разработки не позволит использовать максимум возможностей этой системы. При доработке и улучшении алгоритмов оптимизации и количества учитываемых параметров вычислительная сложность растет и требования к ресурсам вырастают соответственно. При решении сложных, тяжело формализуемых, изменчивых задач крайне важно использование пользовательского опыта и проведение большого количество испытаний на местности. Необходимо встраивание разработанных алгоритмов в единую систему для сбора, хранения и обработки данных, а также для общения целевой аудитории и предоставление возможности работать с системой в виде сервиса, с

использованием серверных вычислительных мощностей. Разбиение всей сложной задачи моделирования на несколько автономных шагов позволяет ускорить процесс проектирования, а организация хранения промежуточных результатов – позволит использовать их многократно в различных задачах.

Библиографический список

1. Budimir, D. Cad for broadband wireless access design / D. Budimir, B. N. Shelkovnikov // 5th international conference on telecommunications in modern satellite, cable and broadcasting service. Telsiks 2001. Proceedings of papers (cat. No. 01ex517). – IEEE, 2001. – Vol. 2. – P. 525–528.
2. Dalmaso, I. WiMAX networks for emergency management based on UAVs / I. Dalmaso, I. Galletti, R. Giuliano, F. Mazzenga // IEEE First AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL-2012). – IEEE, 2012. – 6 p.
3. Blinova, O.V. On how to model and investigate the interaction of mobile network nodes with a limited number of mobile access points / O.V. Blinova // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1864. – 8 p.
4. Блинова, О.В. Поиск оптимальных точек расположения сетевых устройств для беспроводных сетей с учетом траекторий движения абонентов и распространения сигнала / О.В. Блинова // Управление большими системами. – 2022. – Вып. 95. – С. 136–151.
5. Rovira-Mas, F. Creation of three-dimensional crop maps based on aerial stereoimages / F. Rovira-Mas, Q. Zhang, J. F. Reid // Biosystems engineering. – 2005 – Vol. 90, No. 3. – P. 251–259.
6. Früh, C. An automated method for large-scale, ground-based city model acquisition / C. Früh, A. Zakhor // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 60, No. 1. – P. 5–24.
7. Ruzinoor, C.M. A review on 3D terrain visualization of GIS data: techniques and software / C.M. Ruzinoor, A.R.M. Shariff, B. Pradhan, M. Rodzi Ahmad, M.S.M. Rahim // Geo-spatial Information Science. – 2012. – Vol. 15, No. 2. – P. 105–115.
8. Karulkar, S.A. Optimal Placement of Base Station for Cellular Network Expansion. / S.A. Karulkar, J.Y Oh // Information Systems. – 2016. – Vol 17, No. 2. – P. 215–220.
9. Вежливцев, П.Г. Разработка веб-портала «Добрый город» на Django фреймворке. / П.Г. Вежливцев, Т.В. Хозяинова // Информационные технологии в управлении и экономике. – 2020. – №. 4. – С. 78–81.
10. Tatnall, A. Web portals: the new gateways to Internet information and services. / A. Tatnall. – Igi Global, 2005.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПЛОТНОСТИ СКОПЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ (В ПРИЛОЖЕНИИ К СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМ ЗАДАЧАМ)

В.А. Галкин, А.В. Макаренко

Представленная работа направлена на исследование и анализ подходов и алгоритмов оценивания плотности скопления объектов и подсчет их числа по фотоизображению в видимом диапазоне длин волн в приложении к сельскохозяйственным задачам. Подход основывается на использовании сверточной нейронной сети для формирования карт плотностей. Полученная ошибка предсказания числа объектов на тестовой выборке менее 1%, но наблюдается деградация точности при вариации метрических характеристик объектов.

Ключевые слова: глубокое обучение, сверточные сети, подсчет числа объектов, оценивание плотности, сельское хозяйство.

Введение. Развитие науки и техники, в частности технологий компьютерного зрения и глубокого обучения привело к возможности решения широкого спектра прикладных задач. Актуальным и перспективным направлением является визуальный анализ скопления объектов. Скоплением называют множество объектов, с возможными внутренними взаимодействиями, объединение которых может рассматриваться как единая система. Релевантными в анализе скоплений являются две взаимосвязанные задачи: оценивание плотности распределения объектов и подсчет числа наблюдаемых объектов на целевом изображении. Пространственная информация о плотности распределения дает возможность для: анализа поведения, анализа перегрузок, обнаружение аномалий и событий.

В терминах компьютерного зрения, в упрощенной постановке, плотность скопления объектов может интерпретировать как количество объектов, содержащихся в одном пикселе. Массив пикселей, каждый из которых содержит плотность распределения объектов для соответствующего изображения, называют картой плотности.

Выделяют два основных подхода к решению представленной задачи. Первый подход заключается в решении задачи локализации и/или сегментации экземпляров, с последующим использованием полученной информации о наблюдаемых объектах для построения карты плотности и непосредственном подсчете числа объектов.

Вторая группа методов основана на непосредственном поиске неизвестного отображения между целевым изображением и соответствующей картой плотности. Для подсчета числа объектов используется интегральная оценка по карте плотности.

Цель представляемой работы заключается в исследовании и анализе подходов и алгоритмов к оцениванию плотности скопления наблюдаемых объектов и подсчет их числа в приложении к сельскохозяйственным задачам. Новизна данной работы состоит в переходе от точечной интерпретации скоплений [1, 2] к детальной интерпретации сцены, с учетом метрических и геометрических характеристик объектов.

Обзор существующих методов. Как было отмечено выше, выделяют две основные группы методов. Первая группа основывается на решении задачи локализации и/или сегментации, с последующим формированием карты плотности из локализирующих прямоугольников и/или сегментирующих масок. В настоящее время, алгоритмическим ядром подходов к локализации и сегментации объектов являются глубокие сверточные нейронные сети. Стандартные нейросетевые подходы к решению этих задач не предназначены для функционирования в условиях высокой степени окклюзий, по этим причинам наблюдается деградация их точности. Были предприняты множественные попытки по адаптации подходов к сценам высокой плотности, которые можно разделить на две группы:

- модификация функции потерь для минимизации отклонений локализирующих прямоугольников от объекта: RepLoss [3], AggLoss [4], EMDloss [5];

- модификация алгоритма NMS: soft-NMS [6], adaptive-NMS [7], VG-NMS [8], R2-NMS [9].

Наиболее высокую точность показывают решения, использующие для локализации/сегментации информацию о плотности распределения объектов в плоскости изображения, что приводит к необходимости использования методов второй группы для адаптации к анализу скопления объектов методов первой группы. По этим причинам, в данной работе будут использованы методы второй группы.

Вторая группа методов нацелена на прямой поиск неизвестного отображения между изображением и соответствующей картой плотности. На текущий момент, главным инструментом формирования карт плотностей стали глубокие нейронные сети, особенность которых заключается в способности выделять высокоуровневые признаки из «сырых» необработанных данных и универсальные аппроксимационные свойства. Таким образом, нейронная сеть выступает в качестве аппроксиматора неизвестного отображения между изображением и картой плотности. В качестве оценки числа объектов выступает интеграл по карте

плотности, который в дискретном случае представляет собой сумму всех пикселей. Подходы второй группы стали темой многочисленных обзорных работ [10–12], поэтому детальное рассмотрение выходит за рамки данной работы.

Задача подсчета числа животных с использованием карт плотностей была рассмотрена в работе [13]. В представленной работе использовался набор данных, собранный из множества различных онлайн источников. Полученному набору данных присуще вариативность по перспективе съемки, освещению и размерам объектов. Используемая в работе модель основана на архитектуре ResNext. Результирующая точность по метрике MAE 1.67, причем при количестве наблюдаемых объектах более 10 наблюдается деградация в точности подсчета количества животных, которая достигает ошибки в 50% на приведенных в статье экземплярах.

Исходные данные. Исходными данными для решения поставленной задачи являются видеоролики производственного станка, в котором содержатся животные. Кадр видеоролика представляет собой трехканальное изображение с разрешением 1700×1700 . Разметка данных для одного кадра представляет собой множество локализирующих прямоугольников, которые будут использованы для получения точечной разметки объектов (объект характеризует центральная точка прямоугольника). Всего было размечено 16 минутных роликов, с частотой съемки 10 кадров в секунду, общее число кадров в выборке 9 600. Размеченный набор данных содержит только крупных особей.

Истинная карта плотности. В подавляющем большинстве работ по оцениванию карты плотности, для формирования истинных карт плотностей, используют точечную разметку, как показано на рис. 1–2, с последующим размытием нормированного на единицу гауссова ядра:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N \delta(x - x_i) \times G_{\sigma_i}(x).$$



Рис. 1. Пример размеченных данных (синие точки – «центральные» точки объекта)

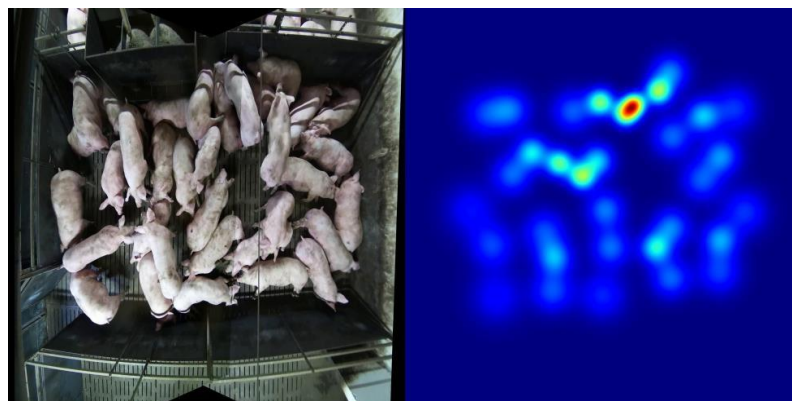


Рис. 2. Пример истинной карты плотности

Данная работа не стала исключением. Вариации генерации карт плотностей определяются видом функции σ_i . Для решения задачи использовалась функция среднего расстояния в пикселях d до k ближайших соседей с коэффициентом β : $\sigma = \beta d$, с параметрами $k = 3$, $\beta = 0.3$.

Нейронная сеть. В качестве отправной точки решения поставленной задачи, следуя работе [14], сформируем референсное решение. Представленная архитектура сети CRSNet состоит из двух частей: backbone сеть – модификация сети VGG-16 без использования полносвязных слоев; композиция сверток, агрегирующих карты признаков в карту плотности. Следует отметить, что вторая часть нейронной сети использует разреженные свертки (dilated convolution) [15], с целью сохранения детализации. Параметр разрежения (dilation rate) равен 2. Используемая функция активации – ReLU, выходная функция активации – линейная.

Размер входа нейронной сети равен 512×512 . Подготовка данных перед подачей в нейронную сеть состояла из билинейной интерполяции для снижения размерности изображений и алгоритма выравнивания гистограмм цвета CLAHE [16] для частичного нивелирования проблемы плохого освещения. Представленная сеть имеет размер выхода 64×64 . Архитектура сети представлена на рис. 3.

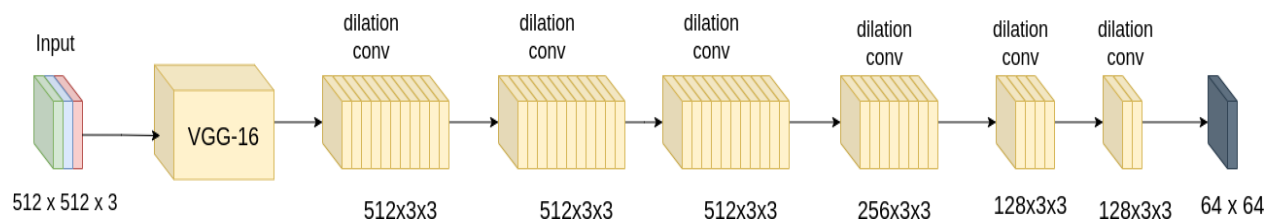


Рис. 3. Архитектура сети CRSNet

Размеры входного изображения и результирующей карты плотности должны быть идентичными, по этой причине выход сети подвергался билинейной интерполяции до размера входа.

Стратегия обучения. Размеченный набор данных, включающий 16 минутных роликов, был разбит на обучающий и проверочный набор в пропорции 13:3. Для увеличения обучающей выборки и улучшения сходимости сети была использована стратегия сильной аугментации с использованием библиотеки albumentation, которая включала в себя: случайные повороты, зеркальные отражения, гауссовский шум, смаз, случайное масштабирование, перспективное преобразование, дисторсию и перемешивание RGB каналов. Перед подачей на нейронную сеть, изображения после случайной композиции преобразований стандартизировались с вектором средних (0.485, 0.456, 0.406) и дисперсией (0.229, 0.224, 0.225) при предварительной нормализации в диапазон [0,1].

Для обучения нейронной сети использовался оптимизатор AdamW [17]. Процедуру обучения можно разбить на 2 части: предобучение сети и тонкая настройка весов. Используемая конфигурация параметров обучения приведена в табл. 1.

Таблица 1

Параметры обучения референсной модели

	Предобучение	Тонкая настройка
оптимизатор	AdamW	AdamW
Количество эпох	35	150
Размер мини-пакета	32	32
Темп обучения (lr)	$7e^{-4}$	$5e^{-4}$
Сокращение весов	$5e^{-4}$	$1e^{-8}$
Изменение lr	StepLR	CosineAnnealingLR

Задача оценивания распределения плотности относится к задачам регрессии, поэтому в качестве функции потерь использовалась функция MSE.

Архитектура используемой сети является простой композицией слоев свертки и пулинга. Как известно, архитектуры такой топологии трудны в обучении по причине затирания информации и затухания градиентов [18]. Поэтому для облегчения процедуры обучения воспользуемся предобученными [19] на ImageNet весами сети VGG-16 и проведем три вычислительных эксперимента в одинаковых условиях:

- эксперимент №1, обучением нейронной сети «с нуля»;
- эксперимент №2, использование предобученных весов и дообучение всей модели;
- эксперимент №3, использование предобученных весов, заморозка части сети (backbone – VGG-16) и обучение выходных сверток;

Для корректности сравнения на каждый эксперимент проводилось 3 повторных запуска при различной инициализации. По результатам обучения, была отобрана топ-1 сеть для каждого из трех экспериментов.

Оценивание качества моделей. Для подсчета количества объектов из карты плотности, воспользуемся подходом, который заключается в дискретном аналоге интегрирования карты плотности, а именно в прямом суммировании полученной из нейронной сети карты плотности.

Для оценивания качества моделей были использованы три релевантные для этой задачи метрики, а именно: MSE, коэффициент структурного подобия (SSIM) [20] для оценки качества карты плотности, а также MAPE по числу объектов. Сравнение результатов обучения на тестовой выборке приведено в табл. 2. При оценивании точности была взята медиана по всем кадрам из тестовых роликов.

Таблица 2.
Оценка качества модели на тестовой выборке

Эксперимент	MSE	SSIM	MAPE
№1	$1.72e^{-8}$	0.999	0.129
№2	$1.56e^{-9}$	0.999	0.126
№3	$1.707e^{-9}$	0.999	0.035

Эксперимент №3 показывает наилучшие результаты по метрике MAPE. Из полученных результатов можно заметить, что даже при создании высокоточных карт плотностей, подсчет количества животных является менее точным и устойчивым.

Проведем второе тестирование нейронной сети на отложенной выборке. Стоит отметить, что отложенная выборка снималась в тех же условиях, что обучающая и проверочная, однако на ней наблюдаемые объекты имеют размер меньше. Пример экземпляра из отложенной выборки с наложением карты плотности приведен на рис. 4.



Рис. 4. Пример данных из отложенной выборки с наложением карты плотности

По причине отсутствия разметки на отложенной выборке, оценим только ошибку в количестве объектов. Медианная ошибка на отложенной выборке более 40%, что свидетельствует об отсутствии инвариантности по лученного алгоритма относительно изменения размера объектов.

Заключение. В представленной работе приведено решение задачи оценивания плотности распределения объектов и подсчета числа животных в производственном станке. Было сформировано и проанализировано референсное решение. Анализ результатов показал отсутствие инвариантности подхода к оцениванию плотности объектов к изменению геометрических характеристик объектов. Исправление найденных недостатков будет являться предметом дальнейших исследований. Стоит отметить, что в сравнении с работой [13] полученной решение обладает большей точностью, за счет фиксации ракурсов, а, следовательно, и перспективы съемки.

Библиографический список

1. Idrees, H. Multi-source multi-scale counting in extremely dense crowd images / H. Idrees, I. Saleemi, C. Seibert, M. Shah // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – IEEE, 2013. – P. 2547–2554.
2. Zhang, Y. Single-image crowd counting via multi-column convolutional neural network / Y. Zhang, D. Zhou, S. Chen et al. // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – IEEE, 2016. – P. 589–597.
3. Wang, X. Repulsion loss: Detecting pedestrians in a crowd / X. Wang, T. Xiao, Y. Jiang et al. // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – IEEE, 2018. – P. 7774–7783.
4. Zhang, S. Occlusion-aware R-CNN: detecting pedestrians in a crowd / S. Zhang, L. Wen, X. Bian // Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV). – 2018. – P. 637–653.
5. Chu, X. Detection in crowded scenes: One proposal, multiple predictions / X. Chu, A. Zheng, X. Zhang, J. Sun // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – IEEE, 2020. – P. 12214–12223.
6. Bodla, N. Soft-NMS improving object detection with one line of code / N. Bodla, B. Singh, R. Chellappa, L. Davis // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – IEEE, 2017. – P. 5561–5569.
7. Liu, S. Adaptive nms: Refining pedestrian detection in a crowd / S. Liu, D. Huang, Y. Wang // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – IEEE, 2019. – P. 6459–6468.
8. Gahlert, N. Visibility guided nms: Efficient boosting of amodal object detection in crowded traffic scenes [Электронный ресурс] / N. Gahlert, N. Hanselmann, U. Franke, J. Denzler. – arXiv.org, 2020. – Дата обновления: 15.01.2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2006.08547> (дата обращения: 21.06.2022).
9. Huang, X. Nms by representative region: Towards crowded pedestrian detection by proposal pairing / X. Huang, Z. Ge, Z. Jie, O. Yoshie // Proceedings of the

IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – IEEE, 2020. – P. 10750–10759.

10. Sindagi, V. A. A survey of recent advances in cnn-based single image crowd counting and density estimation / V. A. Sindagi, V. M. Patel // Pattern Recognition Letters. – 2018. – Vol. 107. – P. 3–16.

11. Gao, G. Cnn-based density estimation and crowd counting: A survey [Электронный ресурс] / G. Gao, J. Gao, Q. Liu et al. – arXiv.org, 2020. – Дата обновления: 28.04.2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2003.12783> (дата обращения: 23.06.2022).

12. Fan, Z. A survey of crowd counting and density estimation based on convolutional neural network / Z. Fan, H. Zhang, Z. Zhang et al. // Neurocomputing. – 2022. – Vol. 472. – P. 224–251.

13. Tian, M. Automated pig counting using deep learning / M. Tian, H. Guo, H. Chen et al. // Computers and Electronics in Agriculture. – 2019. – Vol. 163. – P. 104840.

14. Li, Y. Csrnet: Dilated convolutional neural networks for understanding the highly congested scenes / Y. Li, X. Zhang, D. Chen // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – IEEE, 2018. – P. 1091–1100.

15. Yu, F. Multi-scale context aggregation by dilated convolutions [Электронный ресурс] / F. Yu, V. Koltun. – arXiv.org, 2015. – Дата обновления: 23.11.2015. – URL: <https://arxiv.org/abs/1511.07122> (дата обращения: 17.06.2022).

16. Loshchilov, I. Decoupled weight decay regularization [Электронный ресурс] / I. Loshchilov, F. Hutter. – arXiv.org, 2017. – Дата обновления: 04.01.2019. – URL: <https://arxiv.org/abs/1711.05101> (дата обращения: 03.04.2022).

17. Huang, G. Deep networks with stochastic depth / G. Huang, Y. Sun, Z. Liu, D. Sedra // European conference on computer vision. – Springer, 2016. – P. 646–661.

18. Weiss, K. Transfer learning techniques / K. Weiss, T.M. Khoshgoftaar, D.D. Wang // Big data technologies and applications. – 2016. – P. 53–99.

ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ НЕЙРОСЕВОВОГО ПЕРЕХВАТА ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛИ

А.А. Галяев, А.И. Медведев, И.А. Насонов

Применен алгоритм машинного обучения Deep Deterministic Policy Gradient для получения решения задачи перехвата машиной Дубинса цели, движущейся по прямолинейной или круговой траектории, а также построены траектории перехвата и получены кривые обучения. Было проведено сравнение полученных управлений и траекторий, полученных при помощи численных методов с аналитическим решением. Также нейросетевое решение было проверено на чувствительность к изменению начальных параметров.

Ключевые слова: задача перехвата, машина Дубинса, алгоритм DDPG, нейросетевой синтез траекторий.

Вопрос перехвата подвижных целей, движущихся по известным траекториям, исследовался с середины 50-х годов [1], когда для описания динамики преследователя стали использовать множество моделей. Одной из основных моделей является машина Дубинса. В своей работе [2] А.А. Марков впервые определил линии с ограниченной кривизной и минимальной длины, соединяющих две точки. Дубинс продолжил исследование в данной области [3] и решил задачу о поиске линии кратчайшей длины с ограниченным радиусом кривизны, соединяющей две точки на плоскости с заданным направлением выхода из первой точки и заданным направлением входа во вторую. Полученные результаты нашли практическое применение для изучения объектов, чья динамика описывается моделью объекта с постоянной по величине скоростью и ограниченным радиусом разворота.

Интерес, вызванный проблемой перехвата машиной Дубинса, обусловлен как теоретическими задачами, решения которых она обеспечивает, так и ее практической значимостью для моделирования кинематики дорожных транспортных средств, построение опорных траекторий для беспилотных летательных аппаратов, самолетов, курсирующих на постоянной высоте, или морских судов. Кроме того, модель машины Дубинса используется в задаче перехвата цели, движущейся по заданной траектории. Такая задача предполагает наличие преследователя, имеющего динамику машины Дубинса и цели, движущейся по заданной непрерывной траектории. В работе [4] было получено аналитическое решение задачи нахождения оптимального времени перехвата и синтеза оптимальной траектории для такой задачи.

Для решение подобных задач, также можно использовать численные методы. В последние годы активно применяются нейросетевые алгоритмы основанные на методе обучения с подкреплением. Данный метод представляет собой технологию машинного обучения, которая изучает управление путем взаимодействия актера со средой [5]. В отличие от классического обучения с учителем, обучение с подкреплением не требует большого количества заранее размеченных данных [6]. Данный метод, наиболее подходящий для поиска управления в задаче перехвата.

В данной работе рассматривается нахождение решения задачи перехвата цели машиной Дубинса, при помощи нейросетевых способов. Положение цели задается непрерывной вектор функцией $E(t) = (x_E(t), y_E(t))$, в нашем случае предположим, что цель движется по прямолинейным или круговым траекториям. Перехват будем считать успешным, если расстояние между целью и машиной Дубинса меньше, чем заранее заданное L .

Однако классические алгоритмы обучения с подкреплением могут получить оптимальное управление, только когда пространство действий дискретно, а размерность мала. По этой причине в данной работе используется улучшенный алгоритм Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) [7], DDPG – это Actor-Critic метод глубокого обучения, состоящий из двух моделей: Actor — это нейросеть, которая принимает состояние в качестве входных данных и выводит точное действие, а не распределение вероятностей по действиям и Critic — это нейросеть, которая принимает состояние и действие в качестве входа и выводит Q-значение. Также, как и в Deep Q learning (DQL) [7], DDPG также использует буфер воспроизведения для обновления параметров нейронной сети. Во время каждого прогона среды сохраняются все переходы среды из состояния t в состояние $t+1$ (состояние, действие, награда, следующее состояние) и хранятся в кэше конечного размера - буфере воспроизведения. Затем выбираются случайные mini-batch из буфера воспроизведения во время обновления сетей Actor и Critic. Буфер воспроизведения необходимо использовать для того, чтобы данные были независимо распределены. Этого не происходит, когда мы оптимизируем последовательный процесс принятия решений, потому что тогда данные не будут независимы друг от друга. Когда мы храним их в буфере воспроизведения и берем случайные mini-batch для обучения, мы преодолеваем эту проблему. Кроме того, для повышения стабильности обучения и улучшения сходимости алгоритма, DDPG использует концепцию обновлений программных целей вместо прямого копирования весов в целевую сеть. Проблема исследования решается путем добавления шума, полученного от шумового процесса типа Орнштейна-Уленбека, к управлению.

На рис. 1–2 изображены траектории, синтезированные аналитическим решением и сетью. Видно, что в некоторых случаях сеть выбирает управление, близкое к оптимальному и способна эффективнее решать задачу быстрогодействия из-за условия δ -перехвата. Также необходимо отметить, что сеть не способна двигаться по прямой – значения ее функции управления колеблются около нулевого значения, а отклонения не превышает значение радиуса перехвата. Такое поведение можно объяснить тем, что нейросетевое решение является результатом оптимизации локальной функции конкретной задачи, которая отличается от функционала быстрогодействия в постановки задачи.

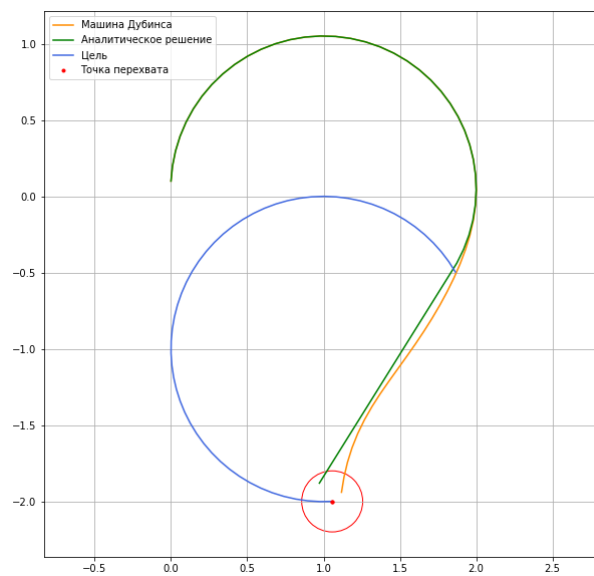


Рис. 1. Сравнение траекторий перехвата цели, движущейся по круговой траектории

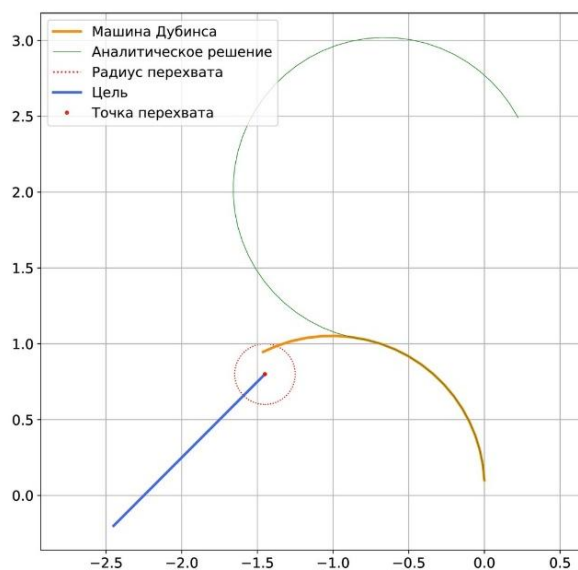


Рис. 2. Сравнение траекторий перехвата цели, движущейся по прямолинейной траектории

Заключение. В работе был применен нейросетевой алгоритм Deep Deterministic Policy Gradient для решения задачи перехвата машиной Дубинса целей, движущихся по прямолинейной и круговой траекториях. Был проведен анализ и сравнение функций управления аналитического и нейросетевого решений. Также было показано, что сеть успешно находит решение на незнакомых для нее параметрах, находящихся вне диапазона обучения. Полученные результаты могут быть применены в дифференциальной игре двух автомобилей.

Библиографический список

1. Айзекс, Р. Дифференциальные игры / Р. Айзекс. – М.: Мир, 1967.
2. Markov, A.A. A few examples of solving special problems on the largest and smallest values / A.A. Markov // The communications of the Kharkov mathematical society. – 1889. – Series 2. – Vol. 1, Iss. 2. – P. 250–276.
3. Dubins, L.E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature and with prescribed initial and terminal positions and tangents. / L.E. Dubins // American Journal of Mathematics. – 1957. Vol. 79. – P. 497–516.
4. Buzikov, M.E. Time-Optimal Interception of a Moving Target by a Dubins Car / M.E. Buzikov, A.A. Galyaev // Autom Remote Control. – 2021. – Vol. 82. – P. 745-758.
5. Arulkumaran, K. Deep Reinforcement Learning: A Brief Survey / K. Arulkumaran, M.P. Deisenroth, M. Brundage, A.A. Bharath // IEEE Signal Processing Magazine. – 2017. – Vol. 34, No. 6. – P. 26–38.
6. Caruana, R. An empirical comparison of supervised learning algorithms / R. Caruana, A. Niculescu-Mizil // ICML Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning. – 2006. No. 6. – P. 161–168.
7. Hartmann, G. Deep Reinforcement Learning for Time Optimal Velocity Control using Prior Knowledge / G. Hartmann, Z. Shiller, A. Azaria // IEEE 31st International Conference on Tools with Artificial Intelligence. – 2019. – P. 186–193.
8. Mnih, V. Human-level control through deep reinforcement learning / V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver // Nature. – 2015. Vol. 518. – P. 529–533.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ, НЕ ПРИНАДЛЕЖАЩИХ ИСХОДНОМУ ДОМЕНУ, В СПЕЦИАЛЬНЫХ ПОДПРОСТРАНСТВАХ ФОРМЫ И ТЕКСТУРЫ

И.И. Журавлев, О.А. Милосердов, А.В. Макаренко

На сегодняшний день одной из основных проблем в задачах компьютерного зрения является непредсказуемость ответов сверточных нейронных сетей (СНС) при подаче им на вход изображений, находящихся вне исходного домена. Недавние исследования демонстрируют, что одной из причин некорректной работы СНС в этих задачах является ее смещение в сторону формирования признаков текстуры. В данной работе мы предлагаем новый подход к формированию представлений исходного домена, представляя признаковое пространство изображений в виде двух подпространств формы и текстуры. Затем мы исследуем выходы СНС на данных, не принадлежащих исходному домену.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть, глубокое обучение, форма, текстура, домен, представления изображений.

Введение. Сверточные нейронные сети достигли превосходных результатов в распознавании изображений [1], однако исследования демонстрируют, что при подаче на вход изображения, не принадлежащего исходному домену данных, выходы СНС оказываются некорректными [2]. В некоторых случаях семантика новых данных совпадает с семантикой обучающих данных, однако выходы СНС могут говорить об обратном. Аналогично с данными, сущность которых кардинально отличается от обучающих данных: ответы сети могут их отождествлять. Существует множество успешных способов решения задачи адаптации домена для семантически идентичных данных, основанные на дообучении сети [3]. При этом исследования в задачах обнаружения данных, не принадлежащих исходному домену, демонстрируют низкое качество. В данной работе предлагается реализовать метод, формирующий на выходах сети пространства признаков формы и текстуры, затем исследовать его в применении к задаче обнаружения данных вне исходного домена.

Связанные исследования. Одна из причин низкого качества нейросетевых методов при решении задачи обнаружения данных вне исходного домена является качество представления изображений в признаковых пространствах, поэтому многие исследования направлены на обучение качественных энкодеров. Широкую популярность имеют методы, основанные на *contrastive learning* и *metric learning* [4–6], которые

уменьшают расстояние между представлениями схожих изображений и отдаляя непохожие. Также ведутся исследования по оценке неопределенности ответов нейросетей [7] с использованием байесовского вывода или использования ансамблей моделей [8] для определения данных вне исходного домена. Однако недавние исследования [9] демонстрируют, что проблема заключается в том, что СНС имеют тенденцию обучаться признакам текстуры, игнорируя информацию о форме. В силу неполноты извлеченных признаков при подаче на вход изображения не из исходного домена возникает неоднозначность.

Форма и текстура. Поскольку в нашей работы мы оперируем такими понятиями, как форма и текстура, необходимо дать им определение, чтобы избежать неоднозначностей при реализации метода и исследовании результатов.

Определение 1. Форма объекта – характеристики границы объекта, инвариантные относительно операций поворота, сдвига, масштаба и отражения.

Определение 2. Текстура объекта – характеристика объекта, описывающая визуальные паттерны, состоящие из пространственно организованных, повторяющихся объектов или субпаттернов (элементов текстуры), которые имеют характерные для этой текстуры свойства (яркость, цвет, форму, размер, ориентацию).

Метод. Описанная во введении идея формирования подпространств формы S и текстуры T позволит явно штрафовать признаки, формируемые СНС. Схема метода представлена на рис. 1.

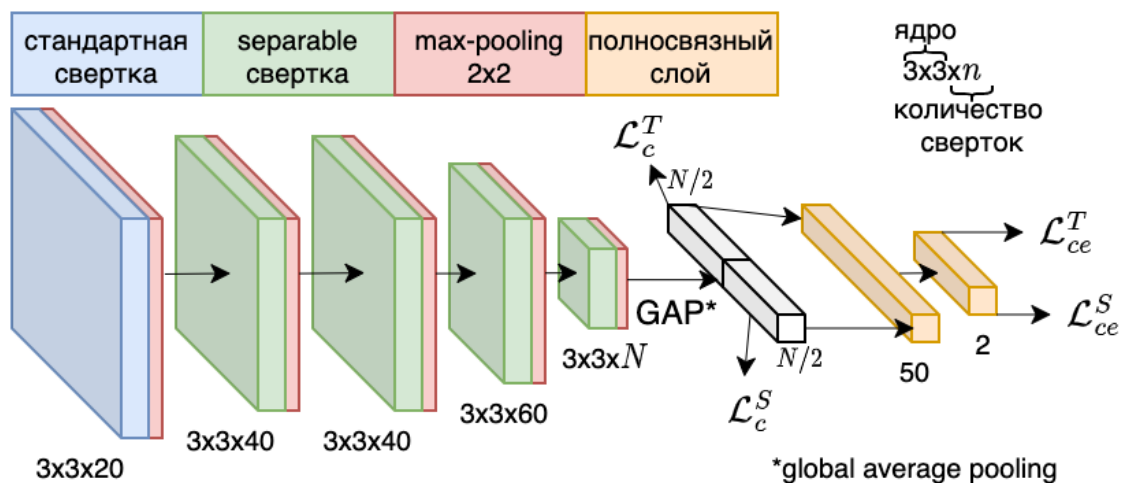


Рис. 1. Схема метода

Формирование подпространств достигается за счет использования функции потерь, описываемой уравнением

$$\mathcal{L}_c = \sum_{i=1}^K \|x_i - c\|_2^2, \quad (1)$$

где x_i – проекция вектора признаков исходного пространства на подпространство формы или текстуры, c – центр кластера отдельного класса в S или T , K – размер мини-пакета. Размерность данных подпространств $N/2$. Классификатор обучается посредством кросс-энтропии \mathcal{L}_{ce} и служит дополнительным штрафом за близость кластеров. Функция потерь (1) позволяет штрафовать векторы признаков в подпространствах S и T за отдаление от общего центра класса. Таким образом, объекты одной формы должны находиться в одном кластере. Аналогично для объектов одной текстуры. Конечный вид функционала эмпирического риска имеет вид

$$Q = \alpha \mathcal{L}_c^S + \beta \mathcal{L}_c^T + \gamma \mathcal{L}_{ce}^S + \theta \mathcal{L}_{ce}^T, \quad (2)$$

где верхние индексы означают подпространства, которые формирует сеть, коэффициенты при функциях потерь регулируют их вклад в обучение.

Данные. Представляют собой изображения объектов 5-и различных форм в комбинации с 5-ю различными текстурами. Таким образом, обучающее множество содержит 25 различных классов. Классы формы: треугольник, эллипс, месяц, квадрат, крест. Классы текстуры: зебра, гладкость, точки, градиент, шум. К каждому сгенерированному изображению применяются случайным образом преобразования сдвига, поворота и масштабирования. Мы определяем целевой класс формы и текстуры и ожидаем, что предложенный метод позволит сформировать кластеры признаков целевых объектов, исключая проникновение в них объектов, находящихся вне исходного домена.

Обучение. Для обучения использовался метод оптимизации Adam. Скорость обучения задавалась следующим образом: начальное значение 0.001, уменьшение в 10 раз после 15 и 25 эпох. Общее число эпох 30. Размер мини-пакета 512. Размер обучающего и валидационного множества: 5000 и 1000 изображений на класс соответственно. Коэффициенты α и β равны 1, γ и θ 0.01 до 20-й эпохи и 0.1 с 20-й по 30-ю эпоху. Для оценки качества обучения основной метрикой кластеризации выступала метрика силуэт Sil [10].

Результаты обучения приведены в таблице 1. Sil характеризует разделимость 4-х классов в исходном пространстве признаков, Sil_{ST}^* характеризует внутриклассовую разделимость объектов одной формы и произвольной текстуры или одной текстуры, но произвольной формы. Sil^* характеризует разделимость кластеров целевой и нецелевой формы или текстуры.

Таблица 1

Результаты обучения

N	Sil	Sil_{ST}^S	Sil^S	Sil_{ST}^T	Sil^T
10	0.84±0.01	0.06±0.02	0.84±0.02	0.02±0.03	0.91±0.01

Исходя из значений метрик кластеризации можно предполагать, что метод обучился формировать признаки формы и текстуры объекта. Теперь перейдем к анализу признаков изображений, не принадлежащих исходному домену.

Данные вне исходного домена. Как говорилось во введении, СНС имеют тенденцию обучаться признакам текстуры, поэтому мы разработали алгоритм, позволяющий явно формировать как признаки формы, так и текстуры. В данном разделе мы описываем данные, позволяющие проверить, на сколько СНС способно различать форму и текстуру, принадлежащую исходному домену. При этом мы исследуем кластеры целевой формы и текстуры. Если на вход сети подается объект с целевой формой, принадлежащей исходному домену, то признаки объекта в подпространстве формы должны находиться в одном кластере целевой формы объекта. Аналогично для признаков текстуры.

Для начала мы сгенерируем объекты, сильно отличающиеся как по форме, так и по текстуре от целевого класса (рис. 2).

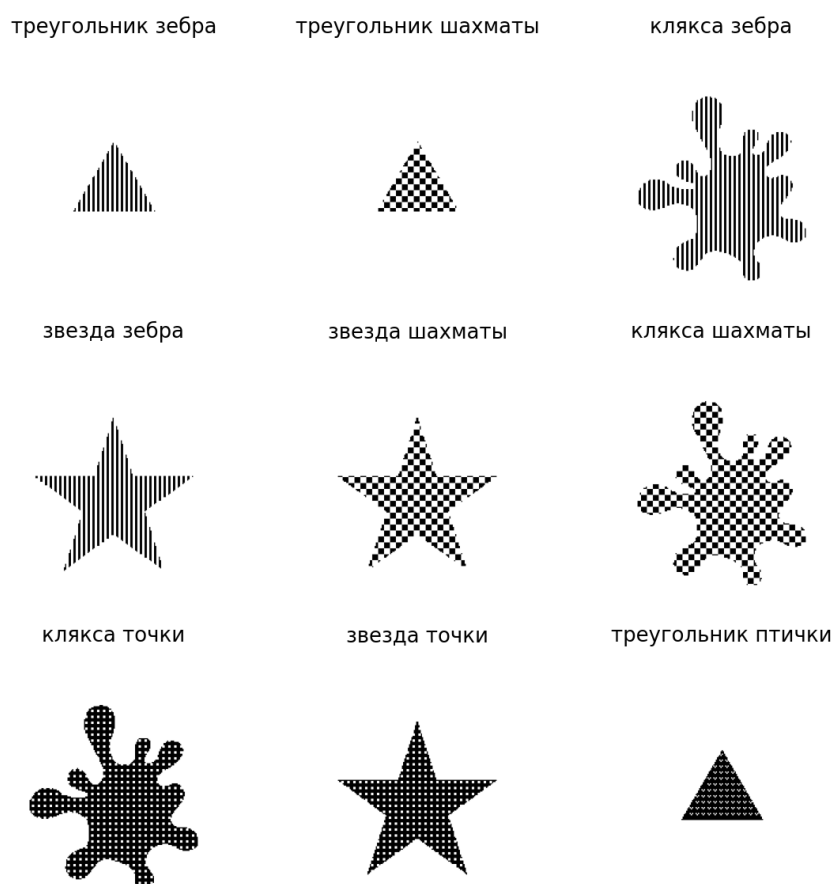


Рис. 2. Изображения вне исходного домена

Данные изображения подаются на вход сети, а затем для полученных векторов признаков формы и текстуры производится оценивание

расстояния до кластера целевой формы и текстуры в соответствующих подпространствах. Поскольку кластеры могут быть произвольной формы, оценка производится на основе медианного евклидового расстояния до 10 - и ближайших соседей. На рис. 3 показано распределение медианных расстояний для объектов внутри целевых кластеров, а также для объектов, находящихся вне исходного домена. Темно-синим цветом обозначены распределения медианных расстояний для объектов целевых кластеров. В легенде через после двоеточия указаны значения расстояний.

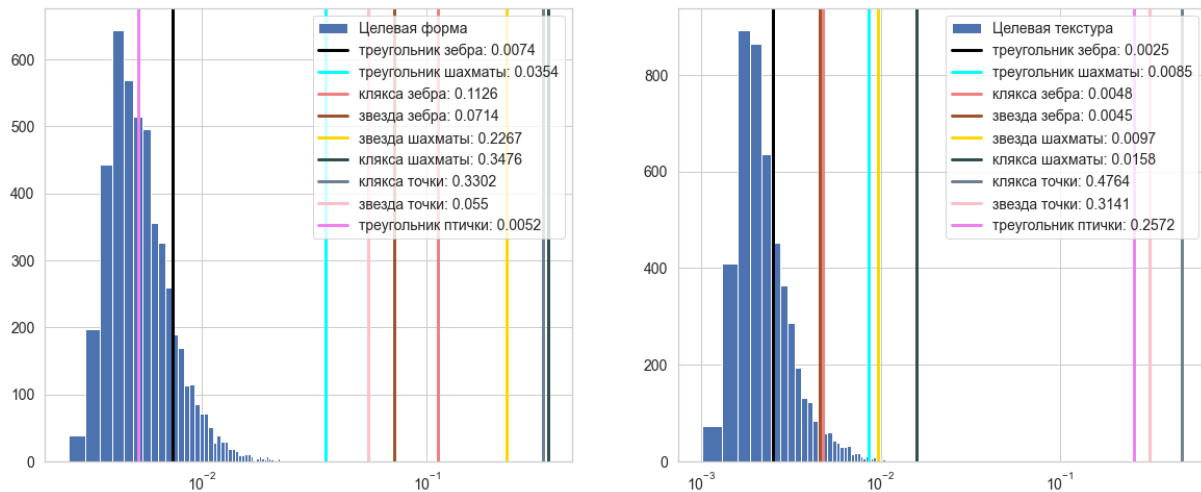


Рис. 3. Медианное расстояние до 10-и ближайших соседей относительно кластеров целевой формы и текстуры

Мы видим, что некоторые нецелевые объекты, например, треугольник с текстурой «птички», действительно не попадают в целевой кластер текстуры. Однако объект с текстурой «шахматы» демонстрирует нежелательный результат в обоих подпространствах, поэтому мы проводим еще одну серию опытов, чтобы выявить причину, по которой нейросеть некорректно формирует векторы признаков.

Сформируем объекты целевой формы, но с текстурой, состоящей из паттернов 5-и форм, из которых формировались объекты обучающего множества, будем называть их патчами. Патч имеет 4 размера, поскольку чем больше патч, тем ближе он к объекту данной формы из обучающего множества, что может оказывать влияние на работу СНС. При этом к данным объектам так же, как в обучающем множестве, применяются преобразования сдвига, поворота и масштабирования. Для каждого патча генерируется 20 изображений. В данной работе мы представляем часть результатов, которых достаточно для формулировки выводов по данному исследованию. Изображения представлены на рис. 4.

На рис. 5 приведены диаграммы разброса медианных значений расстояний как для не инвертированных, так и для инвертированных

данных. Диаграммы «форма» и «текстура» демонстрируют распределение расстояний между объектами соответствующих целевых кластеров. Исследования расположения признаков относительно кластеров целевой формы и текстуры для двух групп изображений демонстрируют неоднозначность. Желаемый результат достигается в большинстве случаев для инвертированных изображений, в то время как для не инвертированных сеть формирует некорректные признаковые представления.

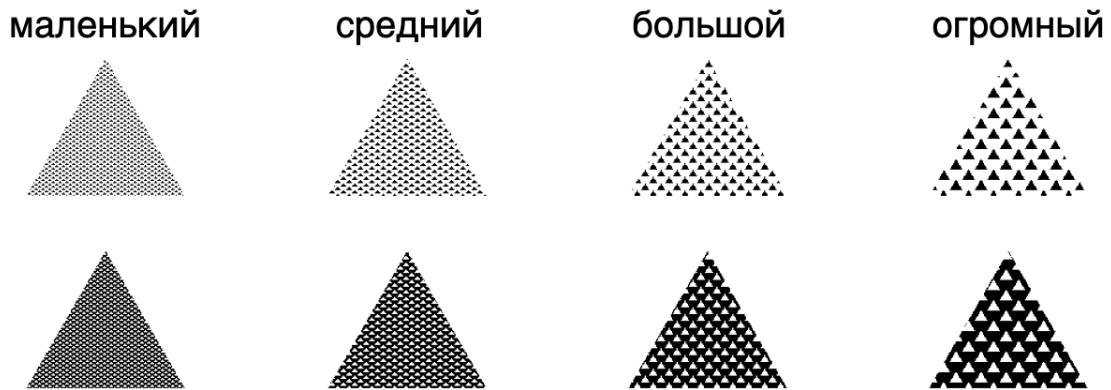


Рис. 4. Верхний ряд – не инвертированные изображения, нижний ряд – инвертированные изображения

Также важно отметить, что доля некорректных признаковых представлений увеличивается при увеличении размера патча. Размер «усов» диаграмм, отображающие 5 и 95 квантили, объясняется степенью искаженности текстуры при масштабировании и повороте.

Милосердов

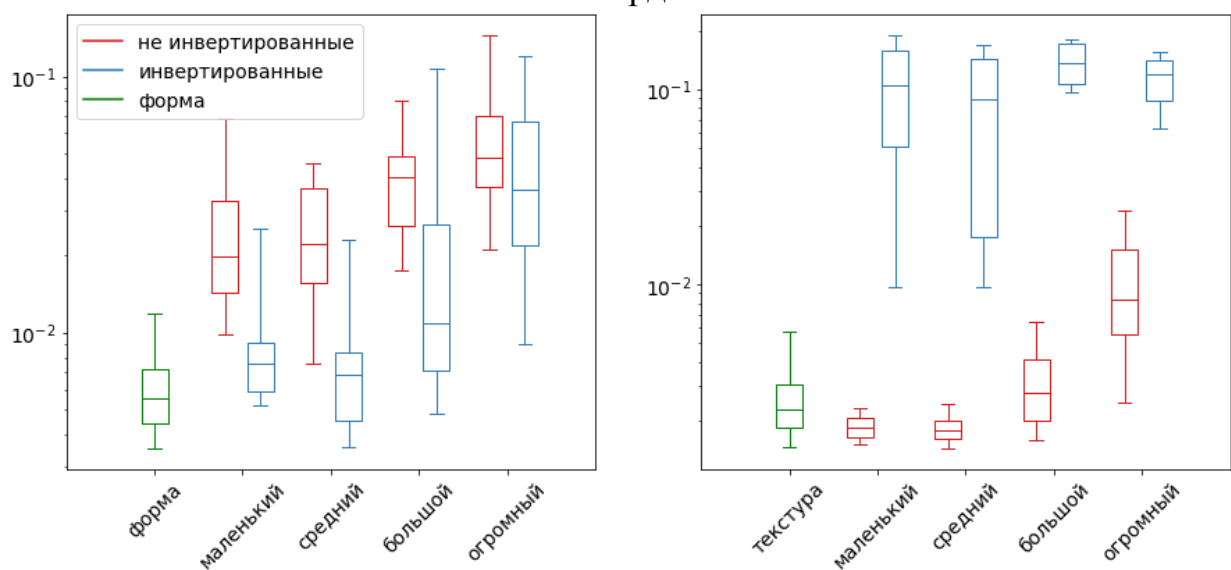


Рис. 5. Диаграммы расстояний для изображений вне исходного домена

Обсуждение результатов. Исходя из проведенного анализа, мы видим, что часть объектов с формой, не принадлежащей исходному домену, сеть не относит в кластер целевой формы и текстуры. Это свидетельствует не только о том, что сеть обучилась извлекать отдельно как признаки формы, так и признаки текстуры, но и формировать уникальные представления для целевых классов. Однако наблюдается, что многие объекты с текстурой вне исходного домена попадают в целевые кластеры. Существует неоднозначность работы сети при анализе ее выходов для ряда изображений (см. рис. 4). Мы предполагаем, что данные результаты являются следствием возникших неоднозначностей в обучающем множестве. Граница объекта целевой формы не представляла собой ограниченный контур и геометрическая фигура обрела очертания треугольника за счет расположения элементов текстуры «зебра». В не инвертированных изображениях также отсутствовала четкая граница объекта, что могло привести к некорректной работе СНС. Также негативным фактором мог быть размер элементов текстуры и расстояние между ними. В данной работе использовалась сеть с 5-ю слоями max-pooling, который мог сильно повлиять на извлечение локальных свойств объекта, а именно, на текстуру.

Заключение. В данной работе был предложен и разработан метод, позволяющий решать задачи определения объектов вне исходного домена. Ключевая особенность метода – явное обучение сети формированию двух признаков пространств формы и текстуры. Результаты обучения свидетельствуют о том, что сеть действительно обучилась извлекать данные признаки. Исследования выходов сети для данных вне обучающего множества также продемонстрировали, что данный метод может использоваться в задаче определения данных вне исходного домена, однако наблюдаются неоднозначности для некоторых типов изображений, связанные с неоднозначностью в исходных данных. Данные неоднозначности будут учтены в последующих исследованиях предложенного метода. Также стоит отметить, что метод продемонстрировал желаемые результаты на данных, которые не допускали в себе неоднозначности

Библиографический список

1. Yu, J. CoCa: Contrastive Captioners are Image-Text Foundation Models [Электронный ресурс] / J. Yu, Z. Wang, V. Vasudevan et al. – arXiv.org, 2022. – Дата обновления: 14.06.2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2205.01917> (дата обращения: 10.07.2022).
2. Pan, S.J. A survey on transfer learning / S.J. Pan, Q. Yang // IEEE Transactions on knowledge and data engineering. – 2010. – Vol. 22, No. 10. – P. 1345–1359.

3. Redko, I. A survey on domain adaptation theory: learning bounds and theoretical guarantees [Электронный ресурс] / I. Redko, E. Morvant, A. Habrand et al. – arXiv.org, 2020. – Дата обновления: 13.07.2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2004.11829> (дата обращения: 27.07.2022).
4. Sohn, K. Learning and evaluating representations for deep one-class classification [Электронный ресурс] / K. Sohn, C. Li, J. Yoon et al. – arXiv.org, 2020. – Дата обновления: 25.03.2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2011.02578> (дата обращения 15.05.2022).
5. Schroff, F. Facenet: A unified embedding for face recognition and clustering / F. Schroff, D. Kalenichenko, J. Philbin // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – IEEE, 2015. – P. 815–823.
6. Liu, W. Sphreface: Deep hypersphere embedding for face recognition / W. Liu, Y. Wen, Z. Yu et al. // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – IEEE, 2017. – P. 212–220.
7. Gal, Y. Dropout as a Bayesian Approximation: Representing Model Uncertainty in Deep Learning / Y. Gal, Z. Ghahramani // Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning. – 2016. – Vol. 48. – P. 1050–1059.
8. Lakshminarayanan, B. Simple and scalable predictive uncertainty estimation using deep ensembles / B. Lakshminarayanan, A. Pritzel, C. Blundell // Advances in neural information processing systems. – 2017. – Vol. 30. – P. 6402–6413.
9. Geirhos, R. ImageNet-trained CNNs are biased towards texture; increasing shape bias improves accuracy and robustness [Электронный ресурс] / R. Geirhos, P. Rubisch, C. Michaelis et al. – arXiv.org, 2018. – Дата обновления: 09.11.2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/1811.12231> (дата обращения 01.05.2022).
10. Rousseeuw, P.J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis / P.J. Rousseeuw // Journal of computational and applied mathematics. – 1987. – Vol. 20. – P. 53–65.

ПРИМЕНЕНИЕ СИНТЕЗА РЕЧИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ БИЗНЕСА

Т.В. Карнета, М.А. Ческидова

Речь является наиболее простым и эффективным способом обмена информацией, в процессе которого собеседник совершает меньше ошибок, быстрее реагирует, чем при других способах обмена информацией. Генерация естественной речи и преобразование текста в речь (англ. «Text-To-Speech») остается сложной задачей. Однако многие крупные компании уже нашли применение данной технологии. Системы TTS успешно применяются в создании голосовых помощников, внедрении голосового управления, а также подобные системы могут использоваться для озвучивания различного образовательного и развлекательного контента и создания цифровой копии своего голоса. В данной статье рассматривается группа нейросетевых моделей, которые образуют систему синтеза речи.

Ключевые слова: синтез голоса, энкодер, просодии голоса, синтезатор, вокодер.

В настоящее время искусственный интеллект стремительно внедряется в различные сферы жизни: умные дома, медицина и здравоохранение, промышленность, государственный сектор. Инновационные технологии не обошли стороной бизнес сферу, в которой активно распространяется использование синтеза голоса. Синтез голоса – это технология перевода текста в речь (text-to-speech) [1], которая позволяет озвучить фрагменты текста голосом любого человека. Данная технология может применяться в создании рекламы и голоса бренда, озвучивании интерфейса сайтов и приложений, внедрении голосового управления, озвучивании образовательного и развлекательного контента на любом языке, а также в создании цифровой копии голоса, позволяющей свободно общаться на любом языке. Для обеспечения качественной генерации речи необходимо выделить речевые особенности голоса, называемые просодиями.

Для создания синтезатора речи использовалась технология Smart Open Virtual Assistant (SOVA), которая предоставила открытую систему перевода из текста в речь на русском языке. Выбранная технология основана на архитектуре Tacotron [2] и не предоставляет возможность многоголосого синтеза речи, а выбор голоса озвучки ограничен. Таким образом, основной задачей создания системы синтеза голоса стало создание системы, позволяющей генерировать разнообразную речь различными голосами.

Сохранение особенностей голоса диктора в синтезированной речи потребовало добавления нового нейросетевого модуля, называемого энкодером. Энкодер – нейросетевая модель, которая преобразует речевой сигнал в вектор, фиксированной длины с выделением речевых особенностей голоса. Затем в процессе сбора полноценной модели синтеза голоса был заменен оригинальный вокодер WaveGlow [3], являющийся объемной моделью, на WaveGrad [4]. Таким образом, синтез речи включает в себя 4 этапа, изображенных на рис. 1.

- модуль по предобработке текста, включающий расстановку ударений в словах и перевода символов в числовой вектор;
- выделение просодии голоса (тембр, высота, громкость и т.д.) при помощи энкодера;
- создание мел-спектрограммы при помощи синтезатора;
- создание синтезированной речи при помощи вокодера WaveGrad.

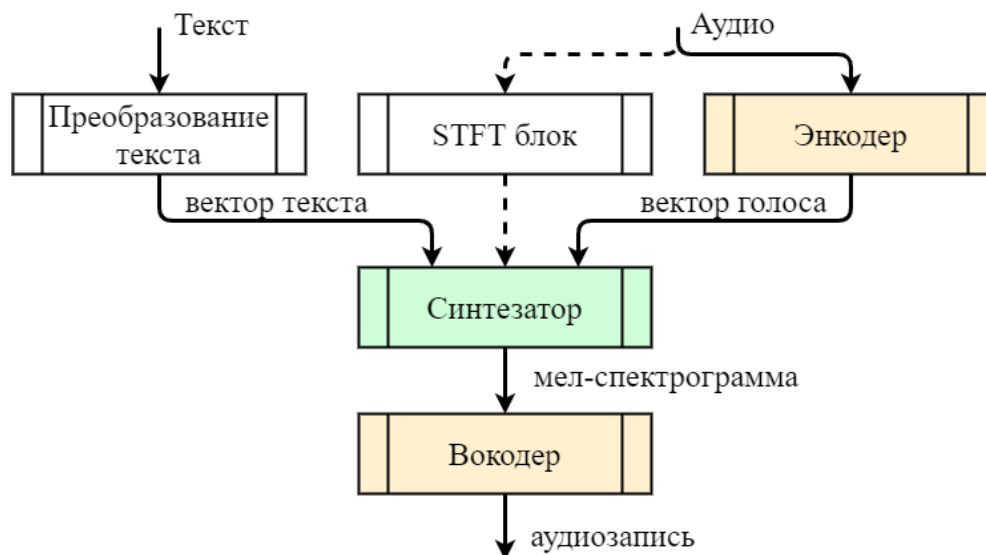


Рис. 1. Общая схема системы синтеза речи

Для обучения энкодера определяется вектор говорящего по следующей формуле:

$$y_{ij} = \frac{f(x_{ij}; w)}{\|f(x_{ij}; w)\|}, \quad (1)$$

где x_{ij} – j -е высказывание i -го диктора; w – веса.

Затем для всех векторов высказываний каждого диктора вычисляются усредненные векторы, называемые центроидами [5], рассчитываемыми по формулам (2–3).

$$c_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M y_{im}, \quad \text{при } k \neq i, \quad (2)$$

$$c_i^{-j} = \frac{1}{M-1} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq j}}^M y_{im}, \quad \text{при } k = i, \quad (3)$$

где i и k – номер диктора, $k \in [0; N]$; j – номер высказывания; N – количество дикторов; M – количество высказываний.

Для окончательной верификации говорящего используется функция потерь, представленная в формуле (4). Данная функция позволяет добиться того, чтобы все высказывания одного диктора стали максимально близки к своему центроиду и отдалились от центроидов других дикторов [6].

$$L_E = \sum_{i,j} \left(-S_{ij,i} + \ln \left(\sum_{k=1}^N \exp(S_{ij,k}) \right) \right), \quad (4)$$

$$S_{ij,k} = \begin{cases} w \cdot \cos(y_{ij}, c_i^{-j}) + b, & \text{при } k = i, \\ w \cdot \cos(y_{ij}, c_k) + b, & \text{при } k \neq i. \end{cases}$$

где $S_{ij,k}$ – матрица подобия всех векторов-высказываний.

В процессе обучения нейронной сети было выбрано 50 дикторов, и у каждого было по 16 высказываний. Результатом обучения стал график, представленный на рис. 2, на котором различные дикторы изображены различными цветами, а в процессе увеличения итераций, высказывания одного и того же диктора становятся настолько близки друг к другу, что отображаются практически в одну точку.

Подобная система может применяться в управлении голосовыми системами умных домов при помощи аутентификации человека по голосу, а также в автоматизированном сборе данных для обучения систем, требующих разнообразное количество голосов людей.

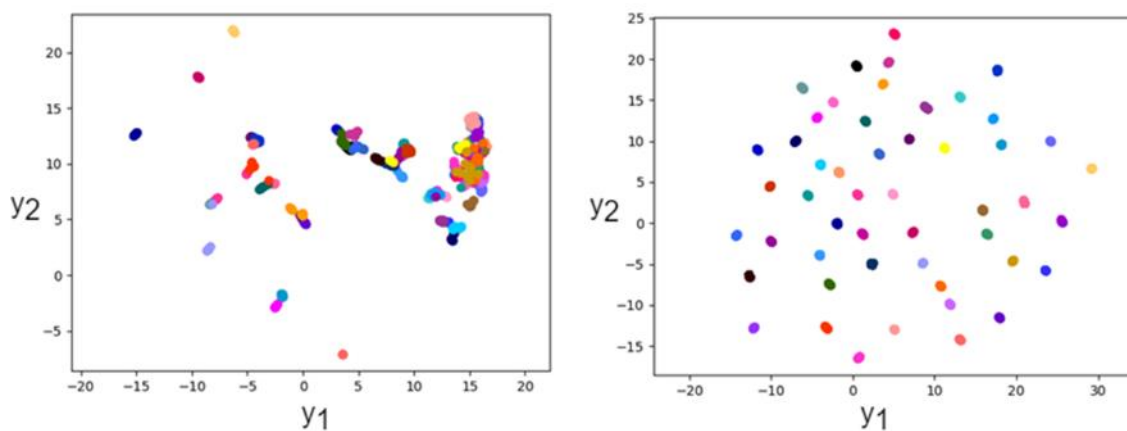


Рис.2. Отображение векторов после 1000 (слева) и 140000 (справа) итераций

Отправной точкой для обучения синтезатора является предобработанный текст и мел-спектрограмма, которая получается из исходной аудиозаписи и отображает спектрограмму полученного звука. На рис. 3 изображен график зависимости мел-спектрограммы от спектрограммы.

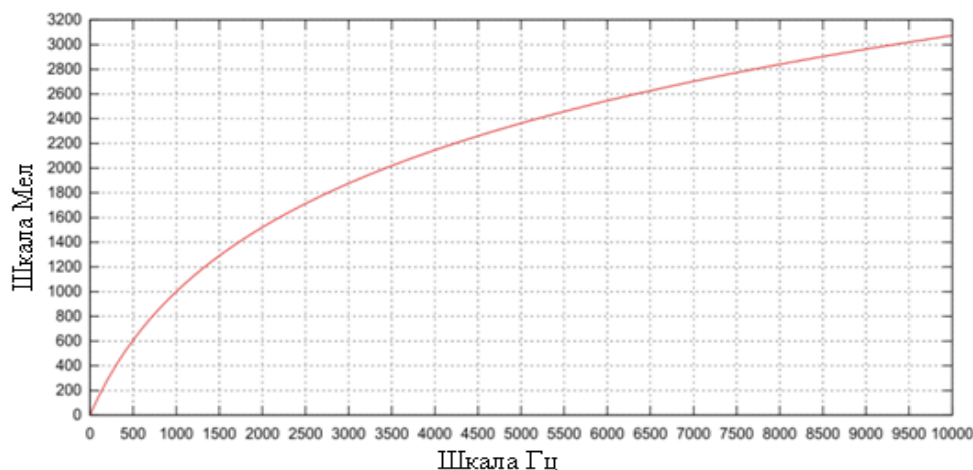


Рис. 3. График зависимости частоты от мел

В качестве основной функции потерь используется совокупность двух функций потерь, представленных в формуле (5).

$$L_S = L_{mel} + L_{gate}, \quad (5)$$

где L_{mel} – среднеквадратическая ошибка между синтезированной мел-спектрограммой и оригиналом; L_{gate} – бинарная кросс-энтропия.

Бинарная кросс-энтропия, представленная в формуле (6), является индикатором для остановки синтеза мел-спектрограмм.

$$L_{gate} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i \cdot \log_2 \sigma(x_i) + (1 - y_i) \cdot \log_2 (1 - \sigma(x_i))), \quad (6)$$

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}},$$

где n – число точек на интервале времени; x , y – символы окончания синтеза исходной и синтезированной мел-спектрограмм.

Среднеквадратичная ошибка (англ. «Mean Squared Error») представлена в формуле (7). Данная ошибка показывает оценку среднеквадратического различия между исходной и предсказанной мел-спектрограммами.

$$L_{mel} = MSE(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2, \quad (7)$$

где x и y соответствуют оригинальной и синтезированной мел-спектрограмме; n – число точек данных по всем переменным.

В результате обучения был получен график, изображенный на рис. 4, который отражает изменение мел-спектрограммы и формирование генерации речи из шума.

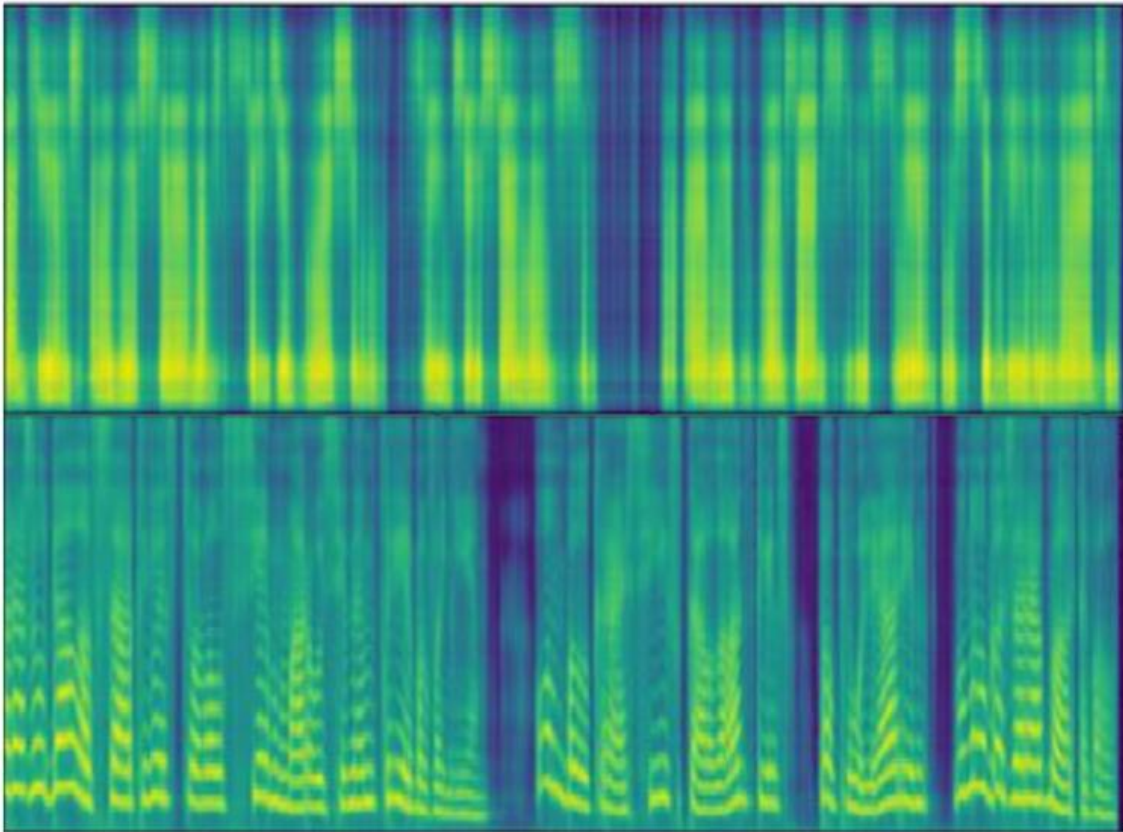


Рис. 4. Синтезированная мел-спектрограмма в начале обучения (сверху) и в конце обучения (снизу)

Последним этапом синтеза голоса является обучение вокодера при помощи функции потерь представленной в формуле (8).

$$L_W = \frac{\sum_{i=1}^n |y_{true} - y_{predicted}|}{n}, \quad (8)$$

где y_{true} – это мел-спектрограмма, полученная из исходного аудио; $y_{predicted}$ – это мел-спектрограмма, полученная из синтезированного аудио; n – количество всех аудио.

Для оценивания качества генерации речи использовалась оценка Mean Opinion Score (MOS) – усредненная оценка разборчивости речи. MOS представляет собой пятибалльную шкалу, в которой 5 означает, что речь почти или совсем не отличается от человеческой, а 1 означает что речь совсем не похожа на речь человека. Для оценивания обученной модели WaveGrad с другими вокодерами был проведен опрос 100 респондентов, которые прослушивали сгенерированные аудиозаписи. Данные о полученных результатах представлены в табл. 1. Было выявлено, что

выбранный вокодер позволяет генерировать аудио максимально приближенное к человеческой речи.

Таблица 1

Результаты сравнения вокодеров

Вокодеры	MOS
Оригинальное аудио	4.45±0.03
WaveGrad	4.43±0.06
WaveGlow	4.12±0.25
WaveRNN	4.04±0.02
WaveNet	3.96±0.06

Заключение. В данной работе была рассмотрена система генерации речи, обеспечивающая широкий спектр выбора голоса для синтеза речи. Подобная система может применяться в озвучивании интерфейсов, что расширит целевую аудиторию. Внедрение голосового управления позволит ускорить работу, а клиенты смогут комфортно пользоваться системой параллельно с другими делами. Создание голоса бренда сделает рекламу для компаний узнаваемой, а создание интерактивных образовательных курсов и озвучивание любого контента станет менее затратным и быстрым. Абсолютно каждый сможет создать цифровую копию своего голоса и свободно общаться на любом языке.

Библиографический список

1. Потапова, Р.К. Системы речевого взаимодействия «человек-машина» и разработка алгоритмов преобразования «текст-речь» / Р.К. Потапова, В.Г. Санников, В. В. Потапов // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2017. – №. 5. – С. 203.
2. Shen, J. Natural tts synthesis by conditioning wavenet on mel spectrogram predictions / J. Shen, R. Pang, R. J. Weiss, M. Schuster, N. Jaitly, Z. Yang, Y. Wu // 2018 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP). – IEEE, 2018. – P. 4779–4783.
3. Prenger, R. Waveglow: A flow-based generative network for speech synthesis / R. Prenger, R. Valle, B. Catanzaro // ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – IEEE, 2019. – P. 3617–3621.
4. Chen, N. WaveGrad: Estimating Gradients For Waveform Generation / N. Chen, Y. Zhang, H. Zen, R. J. Weiss, M. Norouzi, W. Chan. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/2009.00713.pdf>. – 2020. – 15 p.
5. Arasteh, S.T. Generalized LSTM-based End-to-End Text-Independent Speaker Verification / S.T. Arasteh. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1803.05427.pdf>.
6. Wan, L. Generalized end-to-end loss for speaker verification / L. Wan, Q. Wang, A. Papir, I. L. Moreno // 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – IEEE, 2018. – P. 4879–4883.

**ПРИМЕНЕНИЕ КОРНЕЙ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ МАГНИТНОЙ
ВОСПРИИМЧИВОСТЬЮ ВЕН ГОЛОВНОГО МОЗГА
И НАЛИЧИЕМ БОЛЕЗНИ АЛЬЦГЕЙМЕРА**

Л.В. Кожемякин, В.Н. Никитин, А.О. Алексеев

В работе осуществлена попытка аппроксимировать медицинские данные и установить взаимосвязь между магнитной восприимчивостью вен головного мозга и наличием болезни Альцгеймера в виде механизмов комплексного оценивания или как их еще называют в последнее время «корни принятия решения». В качестве медицинских данных используются показатели количественного картирования восприимчивости, позволяющего получить значение магнитной восприимчивости и предоставить информацию о кислородном обмене, имеющем важное значение в оценке метаболизма нейронов. С помощью методов системного-когнитивного анализа определены значимые факторы (значения магнитной восприимчивости вен мозга), которые могут оказывать влияние на когнитивное состояние пациента. С помощью алгоритма идентификации корней принятия решений, была построена дискретная функция, которая с высокой достоверностью описывает исходный набор исследуемых данных (значения магнитной восприимчивости вен мозга) о состоянии пациентов на наличие болезни Альцгеймера.

Ключевые слова: механизмы комплексного оценивания, корни принятия решения, деревья критериев, матрицы свертки, предобработка данных, системно-когнитивный анализ, болезнь Альцгеймера, значение магнитной восприимчивости.

Как показывают исследования последних 20 лет [1–4], все больше людей подвержены заболеваниям и патологиям, связанным с головным мозгом, которые на начальном этапе никак себя не проявляют. Существует ряд исследований [5–7], показывающие взаимосвязь мозгового кровотока, влияющего на насыщение кислородом тканей мозга и соответственно на метаболизм нейронов, с признаками болезни Альцгеймера, которое выражается в нарушении когнитивных способностей человека.

В настоящей работе в качестве исходных данных взяты представленные в открытом доступе результаты исследования головного мозга [8], которые использовались для установлении корреляционной связи между значениями магнитной восприимчивости (англ. magnetic susceptibility value, MSV) для левой и правой базальных вен (L_{BV} и R_{BV} соответственно), левой и

правой внутренней мозговой вен (L_{ICV} , R_{ICV}), левой и правой вен таламуса (L_{TV} , R_{TV}), левой и правой септальных вен (L_{SV} , R_{SV}), левой и правой вен зубчатого ядра (L_{DNV} , R_{DNV}).

Всего в исходных данных представлены сведения о 81 обследованных пациентах, из которых у 59 человек с помощью мини-теста психического состояния (англ. Mini-mental State Examination, MMSE), Монреальского когнитивного теста (англ. Montreal Cognitive Assessment, MoCA), задачи рисования часов (англ. Clock Drawing Task, CDT) и шкалой активности повседневной жизни (англ. Activity of Daily Living Scale, ADL) клинически диагностирована болезнь Альцгеймера, а у 22 пожилых человек не проявляются проблемы в когнитивных способностях.

Целью настоящей работы является попытка аппроксимировать медицинские данные и установить взаимосвязь между магнитной восприимчивостью вен головного мозга и наличием болезни Альцгеймера в виде механизмов комплексного оценивания или как их еще называют¹ в последнее время «корни принятия решения».

В настоящей работе в качестве методов исследования использовались алгоритм идентификации механизмов комплексного оценивания [9] и методы системно-когнитивного анализа (далее – СКА) [10] с применением универсальной когнитивной аналитической системы «Эйдос-X++» [11]. Последние методы использовались для предварительной обработки медицинских данных и сокращения числа используемых показателей.

Предварительный анализ данных. Исходные данные [8] были обработаны с помощью методов СКА. В качестве признаков выступали диапазоны значений показателей магнитной восприимчивости описанных выше вен L_{BV} , R_{BV} , L_{ICV} , R_{ICV} , L_{TV} , R_{TV} , L_{SV} , R_{SV} , L_{DNV} , R_{DNV} , для каждой из которых область наблюдаемых значений была разбита на 3 равных интервала, а в качестве классов использовалось состояние пациента – большой болезнью Альцгеймера (далее – БА) и не большой болезнью Альцгеймера (далее – НБА).

В результате применения СКА были определены диапазоны значений MSV, обладающие наибольшей информационной значимостью для отнесения пациента к классу БА (рис. 3 – «способствующие»), а также признаки, которые в наибольшей степени не характеризуют этот класс (рис. 3 – «препятствующие»). Поскольку в исследуемом наборе данных пациенты относятся всего к двум классам (БА и НБА), то незначимость для класса БА, означает значимость для класса НБА соответственно.

¹ Коргин, Н.А. Корни принятия решений – еще один инструмент для анализа дискретных (категориальных) данных / Н. А. Коргин, В.А. Сергеев. – Изображение (движущееся). Устная речь: электронный // Лекция Коргина Н.А. для студентов ДВФУ по корням принятия решений / Лаборатория № 57 «Активных систем» ИПУ РАН. – Москва, 2021. – (1 ч 44 мин). – URL: <https://youtu.be/b4dF7znmVyo> (дата обращения: 31.03.2022). – Дата публикации: 16.11.2021. – Режим доступа: Лаборатория 57 ИПУ РАН // YouTube, свободный

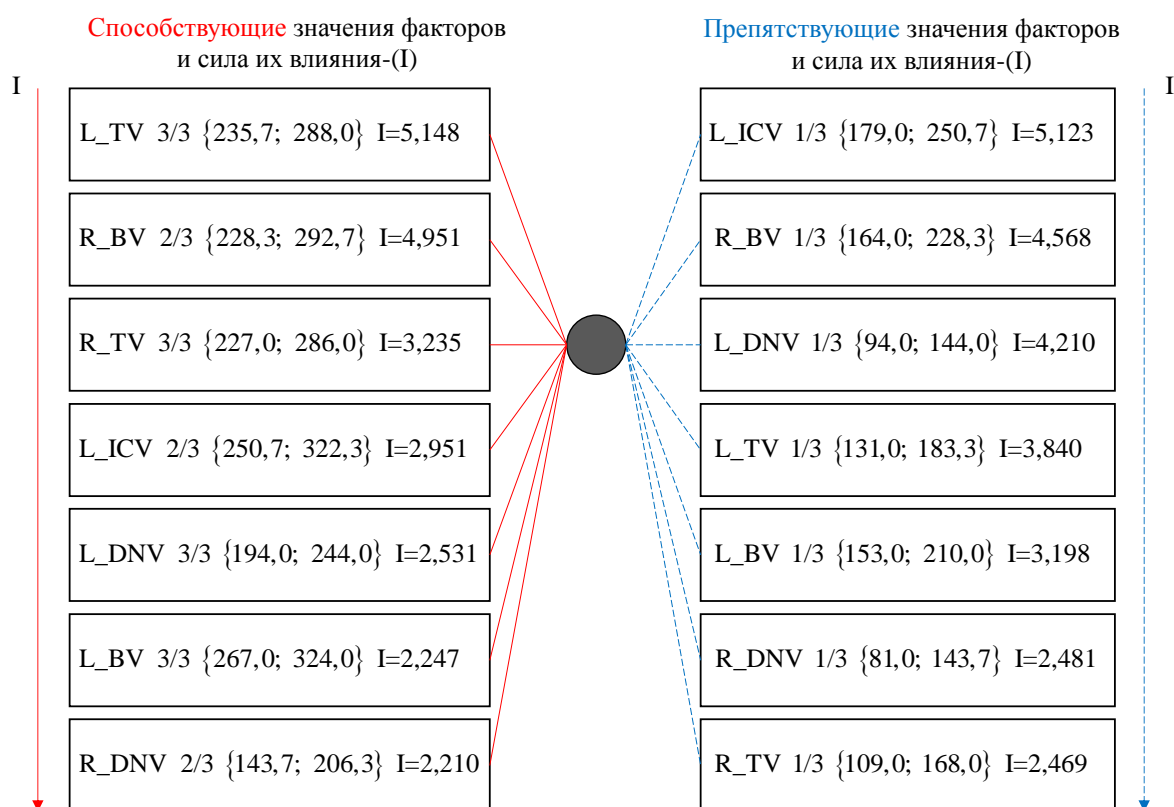


Рис. 1. Наиболее значимые факторы, влияющие на возможную патологию головного мозга в виде болезни Альцгеймера (после названия переменной, соответствующей определенной вене указан порядковый номер диапазона значений из 3, а в фигурных скобках указаны непосредственно диапазоны значений MSV, значение I – информационная значимость указанного признака, определенное с помощью информационной модели INF3[10])

Из рисунка выше видно, что высокие значения MSV (3-и диапазоны) в венах таламуса L_{TV} , R_{TV} относятся к первым 3-м наиболее способствующим факторам, а низкие значения MSV (1-е диапазоны) в тех же венах относятся уже к препятствующим факторам. Другими словами, L_{TV} , R_{TV} могут выступать в роли некоторых триггеров, или переключателей, свидетельствующих об отсутствии или уже проявлении болезни Альцгеймера. Результаты СКА согласуются с результатами [8], где показано, что значения MSV у L_{TV} , R_{TV} и клинично-лабораторными показателями/когнитивными баллами у пациентов с болезнью Альцгеймера (БА) имеют значимую корреляцию для левой и правой вен таламуса, а также ввиду того, что для MSV для левой и правой вен таламуса при сравнении группы с болезнью Альцгеймера и контрольной группы $p < 0,05$.

Дополнительно в настоящей работе в качестве значимых факторов выбраны базальные вены R_{BV} , L_{BV} , ввиду того, что высокие и средние

значения MSV для обоих (3-й диапазон значений MSV у левой базальной вены и 2-й диапазон значений MSV у правой соответственно) вошли в 7 способствующих факторов для отнесения пациента к классу БА (см. рис. 1), а низкие значения MSV (1-е диапазоны значений MSV) как у левой, так и у правой базальных вен, относятся к препятствующим (см. рис. 1), что также можно интерпретировать как переключательный триггер.

Значимость базальных вен также имеет медико-биологическое объяснение – изменения кровотока по базальным венам связано с внутричерепной гипертензией, влияющей на перфузию, т.е. снабжение тканей мозга необходимыми веществами [12].

Таким образом, из числа всех имеющихся показателей были выбраны 4 показателя, характеризующие уровень кислорода венах таламуса L_{TV} , R_{TV} и в базальных венах L_{BV} , R_{BV} , как наиболее значимые.

Идентификация корней принятия решений. Для четырех факторов существует 15 возможных структур деревьев критериев, которые представляют собой полно связные бинарные графы с поименными листьями. Из всех этих вариантов в настоящей работе предлагается свертку произвести показателей, характеризующий левых вен друг с другом, а также правых друг с другом ввиду того, что вены являются парными и участвуют в процессе кровообращения двух полушарий по отдельности, а также ввиду того, что артерии и вены в каждом из полушарий, а далее и мозге в целом, имеют множество коллатералей, которые перераспределяют кровотоки как между собой в начале в рамках одного полушария, а затем при недостатке компенсаторных возможностей в рамках всего мозга (рис. 2).

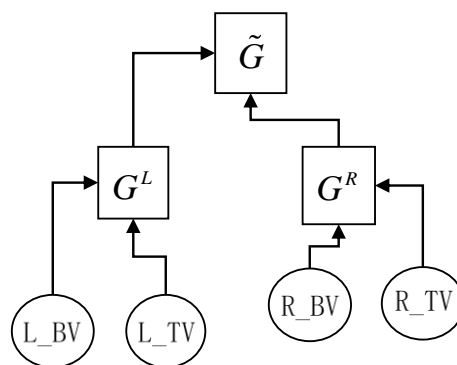


Рис. 2. Дерево критериев, описывающих последовательность свертки MSV для базальных вен и вен таламуса влияющие на возможную патологию головного мозга в виде болезни Альцгеймера

После сокращения числа анализируемых показателей исходные данные были квантированы, путем замены значения MSV у конкретного пациента в конкретной вене (L_{BV} , R_{BV} , L_{TV} , R_{TV}) на значение диапазона,

полученного с помощью СКА. Другими словами, исходный набор [8] был закодирован, в результате чего получен набор дискретных данных, используемый как обучающий для идентификации корней принятия решения. Данные преобразования привели к тому, что исходный датасет был сокращен. Это объясняется тем, что одному и тому же набору номеров диапазонов могло соответствовать несколько пациентов. Это привело к тому, что из 81 пациентов получилось 32 уникальных набора. В этих наборах были примеры с противоречивыми исходами. Поэтому путем анализа частоты разных исходов при одинаковом наборе были исключены те наборы, которые встречались реже у пациентов, например, из 4 пациентов, относящихся к одинаковому набору значений диапазонов только у 1 была диагностирована болезнь Альцгеймера, а у 3 пациентов не было нарушений когнитивных способностей. В результате сокращения противоречивых примеров в дискретном виде, остались наборы, к которым относятся 68 пациентов, что составило 84% от исходного числа испытуемых (пациентов).

В настоящем исследовании использовался алгоритм идентификации корней принятия решений, работающий с любой структурой деревьев критериев, предложенный в работе [9] без ограничения на алфавит, используемый внутри матрицы свертки. Снимая ограничение на используемый алфавит для кодирования элементов матриц свертки, удастся аппроксимировать исходные данные несколькими функциями в силу того, что при склеивании «групп нечувствительности»² происходит вариативность этих склеиваний. Ниже (рис. 3) показан пример корня принятия решения (механизма комплексного оценивания).

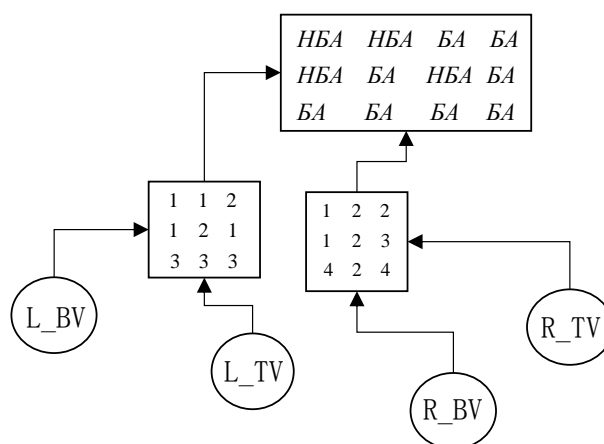


Рис. 3. Корень принятия решений, аппроксимирующий свертки значений магнитной восприимчивости (MSV) для базальных вен и вен таламуса влияющие на возможную патологию головного мозга в виде болезни Альцгеймера

² Данный термин также был предложен Н. А. Коргиным на семинарах по теории управления организационными системами в ИПУ РАН

Найденный корень решения (рис. 3) воспроизводит все уникальные наборы, полученные путем квантирования исходных данных и удаления противоречивых примеров, что соответствует 84% от всех испытуемых (пациентов). Из матриц свертки видно, что получилась нелинейная и немонотонная функция.

Из рис. 3 видно, что при больших значениях MSV у L_{BV} (3-й диапазон от 267,0 до 324,0), какие бы другие значения не принимали показатели L_{TV} , в левой матрице нижнего уровня результатом свертки получается группа 3, то есть в верхней матрице берется 3-я строка, где все элементы соответствуют БА, вне зависимости от значений R_{BV} и R_{TV} и результатов свертки в правой матрице нижнего уровня. Другими словами, при высокой магнитной восприимчивости базальной вены в левом полушарии мы получаем вывод, что пациент, скорее всего, болен.

Стоит отметить, что в матрице верхнего уровня имеется 3-й столбец {БА, НБА, БА}, нарушающий монотонность матрицы свертки. Немонотонность наблюдается и в матрицах нижнего уровня, где сворачиваются приведенные к порядковым шкалам показатели MSV у L_{BV} и L_{TV} в левой матрице, и R_{BV} и R_{TV} – в правой соответственно.

Цель настоящей работы можно считать достигнутой, поскольку удалось показать, что медицинские данные после предварительной обработки могут быть аппроксимированы и представлены в виде корней принятия решений.

Библиографический список

1. Грибанов, А.В. Старение головного мозга человека: морфофункциональные аспекты / А. В. Грибанов, Ю. С. Джос, И. Н. Дерябина, И. С. Депутат, Т. В. Емельянова // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Спецвыпуски. – 2017. – Т. 117, № 1–2. – Р. 3–7.
2. Болезни мозга: проблемы и решения / под редакцией Е.И. Гусева, А.Б. Гехт. – М.: ООО «Сам Полиграфист», 2021. – 416 с.
3. Перепелкина, О.В. Моделирование заболеваний мозга человека в экспериментах на грызунах (краткий обзор) / О. В. Перепелкина, А. Ю. Тарасова, И. И. Полетаева // Современная зарубежная психология. – 2016. – Т. 5, № 4. – С. 13–23.
4. Bilkei-Gorzo, A. Genetic mouse models of brain ageing and Alzheimer's disease / A. Bilkei-Gorzo // Pharmacol. Ther. – 2014. – Vol. 142, №. 2. – P. 244–257. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2013.12.009.
5. Andjelkovic, A.V. Modeling blood–brain barrier pathology in cerebrovascular disease in vitro: current and future paradigms / A.V. Andjelkovic, S.M. Stamatovic, C.M. Phillips [et al.] // Fluids Barriers CNS. – 2020. – Vol. 17, No. 1. – P. 44.
6. Ago, T. The neurovascular unit in health and ischemic stroke / T. Ago // Nihon Rinsho. – 2016. – Vol. 74, No. 4. – P. 583–588.

7. Pericytes in Brain Injury and Repair After Ischemic Stroke / W. Cai, H. Liu, J. Zhao, L. Y. Chen, J. Chen, Z. Lu, X. Hu // *Transl. Stroke Res.* – 2017. – Vol. 8, No. 2. – P. 107–121.
8. Liu, Y. Correlation Between Cerebral Venous Oxygen Level and Cognitive Status in Patients with Alzheimer’s Disease Using Quantitative Susceptibility Mapping / Y. Liu, J. Dong, Q. Song, N. Zhang, W. Wang, B. Gao, S. Tian, C. Dong, Z. Liang, L. Xie, Y. Miao // *Frontiers in Neuroscience.* 2021. – Vol. 14. – P. 570848.
9. Alekseev, A. Identification of Integrated Rating Mechanisms with Non-serial Structures of Criteria Tree / A. Alekseev // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA) [Electronic resource] : proceedings : Lipetsk State Techn. Univ., Lipetsk, Russia, Nov., 10-12 2021 / Lipetsk State Techn. Univ, IEEE, IEEE Industrial Electronics Society, IEEE Industry Applications Society, IEEE Russia section. – New York: IEEE, 2021. – P. 599–603. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9632221> (дата обращения: 16.12.2021).
10. Луценко, Е.В. Сценарный и спектральный автоматизированный системно-когнитивный анализ: научная монография / Е. В. Луценко. – Краснодар: КубГАУ, 2021. – 288 с.
11. Универсальная когнитивная аналитическая система «ЭЙДОС-Х++» (Система «ЭЙДОС- Х++»): свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Луценко Е.В. – № 2012619610; заявл. № 2012617579; поступ. 10.09.2012; опубли. 24.10.2012. Бюл. № 10. – 1 с.
12. Гонгальский, В.В. Динамика кровотока в базальных венах мозга при синдроме доброкачественной внутричерепной гипертензии. Возможности фармакологической коррекции / В. В. Гонгальский, Е. В. Прокопович // *Украинский медицинский часопис.* – 2005. – № 1 (45). – С. 116–188.

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ОБЪЕКТА ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

К.Д. Коновалов, В.С. Олейников, В.Н. Хохловский

В статье описывается процесс разработки цифрового двойника объекта теплоснабжения. В начале были описаны рассматриваемые объекты теплоснабжения. Затем были рассмотрены требования к системе и на их основе была разработана архитектура приложения, позволяющего пользователям взаимодействовать с цифровым двойником. Также был описан процесс выбора топологии рекуррентной нейронной сети для реализации цифрового двойника.

Ключевые слова: объект коммунального теплоснабжения, цифровой двойник, искусственные нейронные сети, АСУ ТП, рекуррентные нейронные сети.

Сегодня разнообразные системы ЖКХ являются неотъемлемой частью любого города. Одним из важных элементов таких систем является система теплоснабжения. Данные системы предназначены для поддержания комфортной температуры в зданиях путем переноса тепла из некоего источника тепла (как правило, в качестве таких источников выступают котельные). Одной из компаний, обслуживающих такие системы в Санкт-Петербурге, является ООО «СЭТ» (Современные Энергосберегающие Технологии).

Цифровой двойник – это цифровая модель конкретного физического объекта, которая отражает структуру, производительность, техническое состояние и характер взаимодействия этого объекта с внешней средой, а также историю технического обслуживания и ремонта реального изделия (физического двойника). Такая копия позволяет выполнять предиктивную аналитику объекта управления. Наличие такой возможности позволяет производить управление более эффективно, а также прогнозировать возникновение аварийных ситуаций на объекте.

ООО «СЭТ» имеет несколько схожих объектов теплоснабжения, которые расположены в разных частях Санкт-Петербурга. Данные объекты имеют ряд параметров. Наиболее важно прогнозирование следующих параметров: T_{nv} – температура наружного (по отношению к объекту теплоснабжения) воздуха, $^{\circ}\text{C}$; T_1 – температура теплоносителя из теплосети, $^{\circ}\text{C}$; P_1 – давление теплоносителя из теплосети, $\text{кгс}/\text{см}^2$ (кгс – килограмм-сила); T_{11} – температура теплоносителя к потребителю, $^{\circ}\text{C}$; T_{21} – температура теплоносителя от потребителя, $^{\circ}\text{C}$; P_2 – давление обратного

трубопровода, кгс/см². При этом существуют некоторые, заранее не известные, временные зависимости между данными параметрами [1], а данные об этих параметрах представлены в виде временных рядов. Таким образом, технология построения цифрового двойника должна позволять с его помощью прогнозировать временные ряды.

Также кроме непосредственно цифрового двойника необходимо разработать приложение, с помощью которого пользователи (как операторы, так и система управления объектами теплоснабжения ООО «СЭТ») могли бы получать данные о результатах работы этого двойника. Совместно со специалистами ООО «СЭТ» были разработаны функциональные требования к данному приложению.

Функциональные требования обычно описываются в виде списка требований к работе системе. Основные из них перечислены ниже:

1) приложение должно являться веб-приложением с возможностью получения доступа к нему с любого компьютера локальной сети и принимать http-запросы;

2) приложение должно предоставлять пользователям два эндпойнта (точки подключения) для запроса данных;

2.1) первый эндпойнт должен обслуживать GET запросы без параметров по адресу `/twin/predict/{object}/{parameter}/current`, где вместо `object` подставляется ID объекта в системе ООО «СЭТ», а вместо `parameter` – имя параметра, значение которого необходимо прогнозировать;

2.2) второй эндпойнт должен обслуживать GET запросы без параметров по адресу `/twin/predict/{object}/{parameter}/from/{dateTime}`, где вместо `dateTime` можно подставить корректное значение даты и времени, начиная с которого необходимо прогнозировать время;

2.3) в случае успешного завершения прогнозирования приложение должно возвращать объект типа JSON, содержащий имя объекта, имя параметра, дату и время момента, с которого проводилось прогнозирование, и результаты прогнозирования в виде списке значений. Также оно должно выставлять статус-код ответа равным 200;

3) приложение должно получать данные путем http-запросов к системе управления объектами теплоснабжения ООО «СЭТ»;

4) при работе с полученными данными приложение должно автоматически уменьшать последовательность до необходимой длины путем отбрасывания наиболее ранних значений. Также оно должно автоматически заполнять пропуски в данных, возникающие в случае каких-либо технических проблем, например, неполадок со связью.

После анализа требования была разработана архитектура приложения. Разработка архитектуры приложения на ранних этапах его создания является весьма важным действием, особенно для корпоративных приложений. Для приложений такого типа рано или поздно возникает

необходимость внедрения новых функций. Без продуманной заранее архитектуры процесс их добавления в приложение может потребовать больших временных и финансовых затрат. Сложность корпоративных систем доходит до того уровня, после которого с задачей невозможно справиться без разработки и поддержания общей архитектуры, которая объединяет систему в связное целое и предотвращает разрозненную реализацию со всеми вытекающими проблемами для тестирования и интеграции [2].

Разработка архитектуры велась с применением унифицированного языка моделирования (UML). Были созданы несколько диаграмм различных типов. Наиболее наглядной из них, а также не содержащей в себе большого количества технических деталей, является так называемая диаграмма коммуникации (Communication Diagram). Данный тип диаграмм описывает основные объекты, присутствующие в системе, и способ их коммуникации друг с другом. Диаграмма коммуникации разрабатываемого приложения изображена на рис. 1.

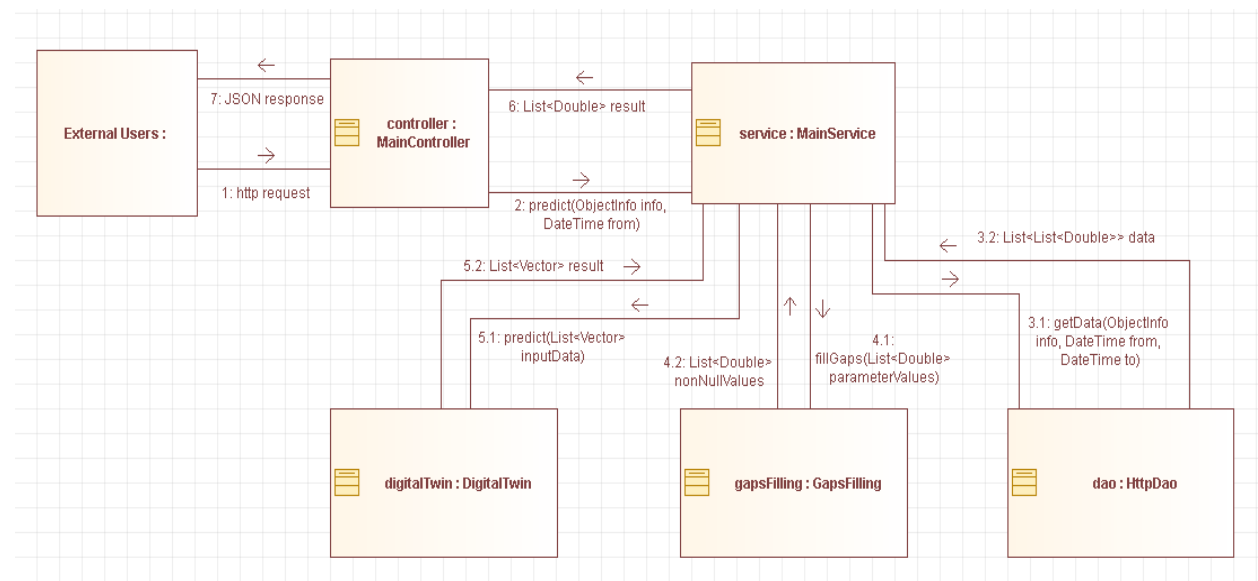


Рис. 1. Диаграмма коммуникации разработанного приложения

Предложенная архитектура соответствует всем описанным ранее требованиям. Например, взаимодействие с моделью машинного обучения при данной архитектуре можно организовать с использованием интерфейса. В этом случае для изменения метода машинного обучения достаточно будет создать новую реализацию этого интерфейса, что практически не потребует изменения кода сервиса.

Основным компонентом данной системы является непосредственно цифровой двойник. Как было отмечено в [1], наиболее подходящей технологией для реализации цифрового двойника являются рекуррентные

нейронные сети. Однако существуют разные типы таких сетей, поэтому необходимо выбрать оптимальный вариант.

Основных типов рекуррентных нейронных сетей существует три: RNN, GRU, LSTM. Эти варианты внутренней структуры нейронных сетей являются типами слоев, которые можно комбинировать в различных вариациях. Формально количество слоев в рекуррентной нейронной сети не ограничено, однако в реальности крайне редко используется более чем 2 слоя, поскольку при дальнейшем увеличении их количества качество работы нейронной сети улучшается незначительно, но количество ресурсов, необходимых для работы и, в особенности, обучения такой нейронной сети становится чрезвычайно большим. Таким образом, мы рассмотрим 12 возможных вариантов топологии с одним или двумя рекуррентными слоями (описание см. ниже).

Для обучения и последующего сравнения рекуррентных нейронных сетей с разными топологиями были использованы данные с реального объекта теплоснабжения. Для проведения максимально объективного сравнения необходимо выбрать наиболее продолжительный участок, где пропуски в данных отсутствуют, чтобы исключить из итоговой ошибки ошибку восстановления данных. Такая последовательность данных находилась в данных с объекта номер 163, она составила 1515 значений подряд.

Перед проведением обучения и сравнения нейронных сетей данные об объекте необходимо было соответствующим образом подготовить. Обучение будет проведено по схеме "all-to-one", то есть в качестве входных данных будут использоваться все доступные данные об объекте, а на выходе ожидается получить прогнозирование значения одного параметра на некоторое время вперед. В ходе обсуждения с представителями предприятия было решено подавать на вход данные за последние 12 часов, а на выходе возвращать значение параметра, спрогнозированное на 3 часа вперед. В качестве прогнозируемого параметра будет использоваться величина температуры подающего теплоносителя. При этом данные с датчиков поступают каждые 5 минут, соответственно, входная последовательность будет иметь длину 144 элемента, а выходная – 36 элементов. С учетом этого из исходных данных были получены 1336 сэмплов для обучения и тестирования. Они были разделены на обучающую и тестовую выборки случайным образом в соотношении 90:10. В обучающую выборку вошли 1208 сэмплов, а в тестовую – 128.

Затем были подобраны параметры обучения. По результатам тестирования было решено зафиксировать количество эпох обучения, равным 1000 и коэффициент скорости обучения равным 0,00001 для слоев типа RNN и 0,0001 для слоев типов GRU и LSTM. Затем были созданы

нейронные сети 12 различных топологий: RNN; LSTM; GRU; RNN-RNN; RNN-GRU; RNN-LSTM; GRU-RNN; GRU-GRU; GRU-LSTM; LSTM-RNN; LSTM-GRU; LSTM-LSTM. Для упрощения размер всех скрытых состояний был установлен равным 8. Затем каждая из созданных нейронных сетей была обучена на обучающей выборке с использованием приведенных выше параметров.

Для оценки качества прогнозирования использовалась метрика среднеквадратичного отклонения (MSE). Вычислялось ее среднее значение на тестовом датасете. Результаты сравнения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение среднеквадратичной ошибки MSE прогнозирования данных рекуррентными нейронными сетями разных топологий на тестовом датасете

Топология	MSE	Топология	MSE
RNN	1,272	GRU-RNN	0,573
GRU	0,482	GRU-GRU	0,283
LSTM	0,592	GRU-LSTM	0,393
RNN-RNN	1,127	LSTM-RNN	0,927
RNN-GRU	1,085	LSTM-GRU	0,735
RNN-LSTM	1,104	LSTM-LSTM	0,821

Как видно, наиболее высокое качество прогнозирования показала нейронная сеть топологии GRU-GRU. Для такой топологии среднеквадратичное отклонение на тестовой выборке составило 0,283.

Заключение. В ходе работы был разработан цифровой двойник объекта теплоснабжения, а также приложение, предоставляющее пользователю API для работы с этим цифровым двойником. Была разработана архитектура этого приложения. Для реализации цифрового двойника использовалась рекуррентная нейронная сеть. Также в ходе работы было проведено сравнение различных вариантов топологии рекуррентной нейронной сети. Лучшим вариантом была признана рекуррентная нейронная сеть с двумя слоями типа GRU, показавшая на тестовом датасете величину среднеквадратичного отклонения, равную 0,283.

Данное приложение может помочь более эффективно управлять объектами теплоснабжения, а также прогнозировать возникновение аварийных ситуаций. Тестирование показало, что приложение работает стабильно, и ошибка прогнозирования является относительно небольшой (около 1,124 по метрике MSE для всего отопительного сезона). Производится подготовка по внедрению данного приложения в систему управления объектами теплоснабжения ООО «СЭТ». Данные из приложения будут использоваться в этой системе для вычисления уставок. Также будут воспроизводиться графики прогнозируемых значений

параметров для объектов, на основе которых эксперты смогут детектировать возможные аварийные ситуации. В дальнейшем этот процесс также может быть автоматизирован, например, с помощью внедрения экспертной системы.

Библиографический список

1. Гаврилова, В.О. Создание цифрового двойника объекта теплоснабжения для системы прогнозирования нештатных аварийных ситуаций: выпускная квалификационная работа бакалавра [Электронный ресурс] / В.О. Гаврилова. – СПб., 2020. – Дата обновления: 23.07.2020. – URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/3/2020/vr/vr20-1050.pdf> (дата обращения: 22.11.2022).

2. Спинеллис, Д. Идеальная архитектура. Ведущие специалисты о красоте программных архитектур / Д. Спинеллис, Г. Гусиос. – СПб.: Символ-Плюс, 2010. – 528 с.

Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение. / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль. – 2-е изд., испр. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 652 с.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА ДЛЯ РУССКОГО ЯЗЫКА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ПРАВИЛ

И.Д. Кудинов

В данной работе приводятся результаты эксперимента с построением компактного морфологического анализатора для русского языка на основе системы правил, автоматически генерируемой на основе морфологического словаря. Получив путем анализа словаря список аффиксов языка, можно использовать их для определения списка вариантов морфологического разбора заданной словоформы. Группировка окончаний в парадигмы позволяет производить лемматизацию слова.

Ключевые слова: обработка естественного языка, морфологический анализ.

Введение. Русский язык, как и любой синтетический язык, обладает богатой морфологией слов. Для связи слов в предложении используются окончания, а для уточнения смысла слов используются приставки, суффиксы и постфикс. Изменяемые части слов: приставки, окончания, суффиксы и постфикс, объединяются под понятием аффикс.

Каждая часть речи обладает собственным набором возможных аффиксов. Корень же, в общем случае, не участвует в определении части речи или других признаков слова. Несмотря на большое число правил и исключений, по которым склоняются и видоизменяются слова в русском языке, они все еще представляют собой систему, которую можно формализовать достаточно подробным набором правил, которые будут корректно работать даже для несловарных слов. В данной работе мы исследовали возможность применения автоматического составления такой системы правил для построения морфологического анализатора.

Задача морфологического анализа. Морфологический анализатор — это программа, которая для входной словоформы возвращает список возможных морфологических разборов. Словоформой называют слово в некоторой грамматической форме. Морфологический анализ словоформ является необходимым этапом обработки естественного текста для многих языковых моделей. Так, синтаксические анализаторы нуждаются в морфологическом анализе каждой словоформы в предложении перед тем, как построить его синтаксическое дерево.

Большинство морфологических признаков словоформы определяются окончанием. Приставки и суффиксы лишь могут подсказать часть речи. Так, словоформа с нулевым окончанием может быть и существительным, и

глаголом, однако суффикс неопределенной формы глагола *-ть-* дает понять, что словоформа является глаголом.

Морфологический разбор словоформы в русском языке в большинстве случаев не может быть однозначным, потому говорят не о получении одного морфологического разбора слова, а об определении списка возможных разборов, возможно отсортированных по степени вероятности. Так, например, словоформа «глаза» на основании окончания *-а* и отсутствию других аффиксов может быть разобрана следующими способами:

1) существительное родительного падежа единственного числа: «нет глаза»;

2) существительное именительного падежа множественного числа: «есть глаза»;

3) существительное винительного падежа множественного числа: «про глаза»;

4) прилагательное женского рода в краткой форме: «глаза» (по аналогии с «она красива»);

5) и другие, редкие, варианты.

Это вся информация, которую можно получить, анализируя только словоформу, не учитывая контекст, в котором она находится. Для многих словоформ число вариантов может быть очень велико. Это происходит из-за того, что большая часть окончаний в русском языке соответствует нескольким возможным вариантам морфологического разбора, иногда даже разным частям речи, как в примере выше. Так, неодушевленные существительные второго склонения пишутся одинаково в именительном и винительном падежах.

Возникают также трудности с определением самих аффиксов во входной словоформе. Окончания для двух слов с одинаковыми морфологическими признаками могут писаться по-разному в зависимости от последней буквы основы словоформы, от склонения существительных, спряжения глаголов. Это делает построение списка окончаний вручную трудоемким делом с риском допущения ошибки.

Также упомянем явление субстантивации, когда формально прилагательное играет роль существительного. Как, например, слова: «существительное», «ископаемое», «командующий».

Составление списка аффиксов. Для создания программы мы использовали свободный морфологический корпус русского языка OpenCorpora [ссылка]. Словарь содержит около 400 тысяч словоизменительных парадигм – множества словоформ одной лексемы. Каждой словоформе в словаре сопоставлен готовый морфологический разбор. Пользуясь тем, что в одной парадигме словоформы отличаются только окончанием (реже – приставкой), мы можем вырезать общую часть

и получить набор окончаний и соответствующих им морфологических признаков.

Таблица 1

Парадигма слова «существительное»

Падеж	Единственное число	Множественное число
Им.	существительное	существительные
Род.	существительного	существительных
Дат.	существительному	существительным
Вин.	существительное	существительные
Твор.	существительным	существительными
Пр.	существительном	существительных

Это не будут окончания в лингвистическом смысле, поскольку в одной парадигме могут быть словоформы с разными суффиксами. Принято эту часть слова называть псевдоокончанием, а общую часть – псевдоосновой. Например, в случае глагола «любить»: словоформа «люблю» имеет суффикс *-л-* и окончание *-ю*, а словоформа «любил» имеет суффиксы *-и-*, *-л-*, и нулевое окончание. Обе словоформы, однако, имеют ненулевые псевдоокончания *-лю* и *-ил*, соответственно. Постфиксы глаголов также входит в понятие псевдоокончания.

Полученные в рамках разбора одной парадигмы словаря псевдоокончания можно сгруппировать для последующего склонения. При выборе одного варианта разбора как верного, например, используя для этого соседние слова, мы так же выбираем парадигму, что дает возможность склонение слова путем подстановки другого псевдоокончания. В частности, это может быть использовано для получения леммы словоформы, что является актуальной задачей.

Обнаружение суффиксов и приставок требует обхода уже нескольких парадигм словаря. Если две псевдоосновы двух парадигм имеют достаточно длинную максимальную общую подстроку, не короче четырех символов, мы можем предположить, что они однокоренные, а оставшиеся части слева и справа считать псевдоприставкой и псевдосуффиксом, соответственно. Пустые псевдоприставки и псевдосуффиксы так же учитываются. Обнаружение псевдоприставок и псевдосуффиксов существенно уменьшает число возможных морфологических разборов словоформы.

Однако, псевдоприставки и псевдосуффиксы не могут быть найдены в словаре в парадигмах слов с корнем короче четырех символов. Предполагается, что остальных парадигм в словаре хватит для покрытия всех возможных псевдосуффиксов и псевдоприставок.

В обработки парадигм нескольких однокоренных слов уже найденные псевдосуффиксы и псевдоприставки могут уточняться. Например, сначала

были обработаны парадигмы, соответствующие словам «запретность» и «запретно», чьей общей максимальной подстрокой будет «запретно», и был обнаружен псевдосуффикс *-сть-*. Позже будет найдена парадигма слова «запрет», псевдосуффикс *-сть-* будет заменен на пару псевдосуффиксов *-ность-* и *-но-*.

Случаи со словами с двумя корнями и другими случаями, когда корень одного слова входит в корень другого, вызывают появление неправильных псевдоприставок и псевдосуффиксов. Однако, такие случаи редки, потому после обработки всего словаря мы убираем из полученного списка наиболее редкие, а значит вероятнее неправильные, аффиксы.

Найденные псевдоаффиксы: псевдоприставки, псевдосуффиксы и псевдоокончания, заносятся в соответствующие списки, отсортированный по частоте встречи в словаре.

Помимо этого, был вручную составлен список слов неизменяемых частей речи: местоимений, предлогов, союзов, частиц.

Морфологический разбор. Морфологический разбор слова происходит в несколько этапов.

В начале происходит проверка совпадения словоформы со списком слов неизменяемых частей речи. В ином случае в словоформе может быть найдено псевдоокончание которого там не может быть, как например частица «а» может быть интерпретирована как псевдоокончание *-а*.

Если словоформа не была найдена в списке, производится поиск псевдоокончания. Если конец слова соответствует нескольким псевдоокончаниям, одно из которых входит в другое, как например окончания *-ое* и *-е*, то рассматривается самое длинное из них. На практике случая, когда оказывалось верным не самое длинное окончание, встречено не было. Если ни одно псевдоокончание не было определено на конце слова, считается что имеет место быть нулевое окончание.

Для оставшейся псевдоосновы аналогичным образом производится поиск псевдоприставки и псевдосуффикса. Таким образом, для входной словоформы будут определены псевдоприставка, псевдосуффикс и псевдоокончание. Пересечение соответствующих им списком вариантов морфологического разбора дает итоговый список вариантов разбора входной словоформы. Собранная статистика по количеству встреч, соответствующих псевдоаффиксов в словаре, позволяет отсортировать оставшиеся варианты по степени вероятности как произведение нормированных вероятностей каждого из псевдоаффиксов.

Получившаяся система правил является аппроксимацией морфологического словаря. Вместо хранения массивного словаря мы можем хранить лишь набор псевдоаффиксов, и при их помощи проводить морфологический анализ словоформ с уменьшением точности. Потеря точности заключается в увеличении числа вариантов разбора.

Заключение. Была проведена проверка построенной система на словаре OpenCorpora, на основе которого была создана. Система проводила морфологический анализ каждой словоформы в словаре. Практически во всех случаях, за исключением 44-х словоформ из четырех букв и меньше, настоящий вариант морфологического разбора был среди выдаваемых системой. Распределение общего числа вариантов разбора словоформы и распределения положения верного ответа в списке можно видеть на рис. 1.

Это означает, что построенная система правил почти полностью покрывает морфологический словарь, на основе которого она построена. Используя только словарь, можно получить один или несколько слабо отличающихся вариантов разбора слова. Используя же построенную систему правил, мы имеем в среднем 5 вариантов разбора слова, зачастую разных частей речи. Это объясняется тем, что система никак не рассматривает смысл слова, который часто является определяющим при определении части речи слова. Словоформа «глаза» формально может являться прилагательным, но на практике такое встречается крайне редко.

Дальнейшая работа по уточнению морфологического разбора входной словоформы может быть осуществлена только при помощи рассмотрения контекста словоформы. Так, перед в предложении перед входной словоформой может стоять предлог, который однозначно указывает на падеж стоящего после него существительного.

Ожидаемо, в около 78.2% случаях верный морфологический разбор является самым вероятным в списке вариантов разбора, предлагаемым системой. Это означает, что в случае любых сомнений можно принять самый первый вариант разбора, и он с высокой степенью вероятности будет верным.

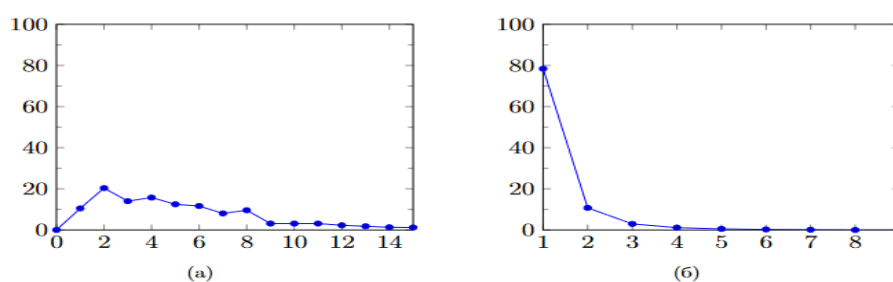


Рис. 1. (а) Распределение числа вариантов разбора словоформы;
(б) распределение вероятности истинности варианта разбора словоформы в зависимости от его положения в отсортированном по частоте списке вариантов разбора

Библиографический список

1. OpenCorpora. — URL: <http://opencorpora.org/>

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КЛАССИФИКАЦИИ ТОМАТОВ ПО СПЕЛОСТИ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

А.Д. Кулакова, В.А. Галкин, А.В. Макаренко

В докладе представлено решение задачи классификации томатов, выращиваемых в условиях промышленных теплиц, по четырем степеням спелости. Разработана архитектура полносвязной нейронной сети. В качестве признаков используются статистические характеристики сегментированного изображения томата в цветовом пространстве HSV, в частности гистограмма распределения цветового тона.

Ключевые слова: классификация, глубокое обучение, сельское хозяйство.

Введение. Развитие науки и техники, в частности технологий компьютерного зрения и глубокого обучения привело к возможности решения широкого спектра прикладных задач. Актуальным и перспективным направлением является автоматизация технологических процессов в агропромышленности, в частности решение задачи классификации объектов агрокультур по их спектральным характеристикам [1–3]. Представляемая работа будет нацелена на решение этой задачи, а именно классификации помидоров по сортам спелости.

Обзор существующих подходов. Выделяют две основные группы методов решения поставленной задачи, которые имеют общий принцип, но отличаются подходом к формированию пространства признаков для последующей классификации. Общий конвейер решения состоит из: локализации целевого объекта, сегментации (отделение объекта от общего фона), преобразования выделенного объекта в пространство признаков и применения алгоритмов классификации.

В методах первой группы пространство признаков формируется «вручную» экспертом. Так, в работе [4] с помощью SVM решается задача бинарной классификации (спелый/не спелый), достигнутая точность по метрике ассигасу 97.74%. В качестве признаков объекта выступали статистические моменты отсегментированного в RGB изображения. В работе [5] использовался алгоритм SVM в пространстве цветовой карты в HSV для многоклассовой классификации (красный, зеленый, промежуточный), достигнутая точность по метрике ассигасу 99.81%.

Методы второй группы используют нейросетевые технологии для автоматического формирования пространства релевантных признаков. В работе [6] предложено комбинирование глубокой сверточной нейронной

сети и плоских моделей классификации, таких как: KNN и SVM. В работе [7] представлено решение на основе сверточной нейронной сети, классификация производится по 3 степени зрелости (красный, зеленый, желтый), ассурасу составляет 99.67%.

Набор данных. Исходные данные представляют собой набор фотосетов, каждый из которых состоит из множества фотографий томата. Количество снимков одного томата может варьироваться от 3 до 40. Съемка производилась при естественном и искусственном освещении в различных ракурсах с использованием трех различных фотоаппаратов: Canon PowerShot G7X Mark II, Canon EOS 550 и Canon EOS 600D. Изображения томатов переведены из цветового пространства RGB (red, green, blue) в HSV (hue, saturation, value). Данное пространство позволяет разделить цветовой тон от насыщенности и яркости.

Вариации спелости томатов были сформированы в 4 класса, которые отражают степень их зрелости: зеленый (рис. 1), слабо-бурый (рис. 2), сильно-бурый (рис. 3) и красный (рис. 4).

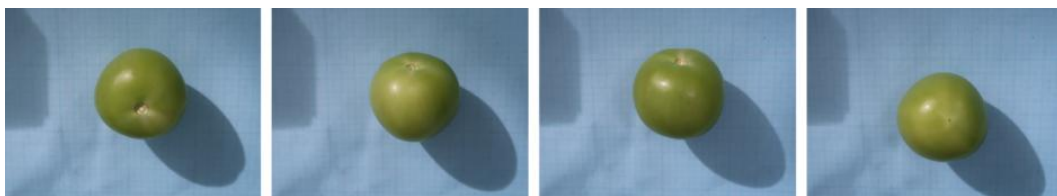


Рис. 1. Зеленый томат



Рис. 2. Слабо-бурый томат

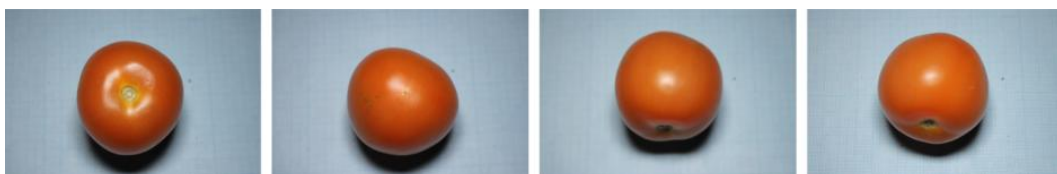


Рис. 3. Сильно-бурый томат

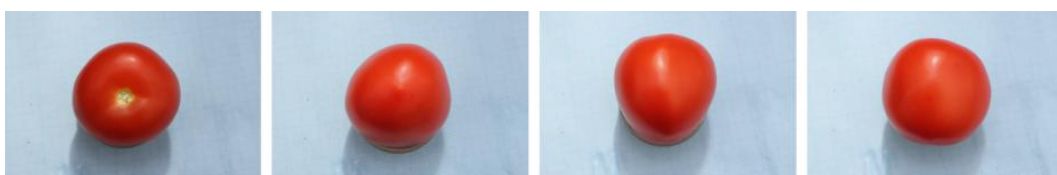


Рис. 4. Красный томат

Постановка задачи и подход. Пусть задано множество объектов X и множество допустимых ответов Y , представляющих собой метки классов. Существует неизвестное вероятностное распределение на множестве $X \times Y$ с плотностью $p(x, y)$. Задача заключается в поиске совместной плотности распределения объектов и ответов $\varphi(x, y, \theta)$, аппроксимирующей неизвестную плотность $p(x, y)$. При этом, требуется определить значение векторы параметров θ , при котором выборка данных $X^l = (x_i, y_i)_{i=1}^l$ из множества $X \times Y$ максимально правдоподобна, то есть наилучшим образом согласуется с моделью плотности.

Подход к решению задачи состоит из трех частей: сегментация объекта, формирование пространства признаков, обучение и дальнейшее использование классификатора.

Для сегментации объекта использовалась двухшаговая стратегия: грубая сегментация с использованием метода водораздела и последующее уточнение маски с применением глубокой сверточной нейронной сети cascadePSP [5].

Определим пространство признаков. В текущей задаче ключевым признаком является цвет томата. В связи с тем, что поверхность томата может иметь неоднородный окрас, для принятия решения о спелости необходимо несколько фотографий с разных ракурсов. В качестве признаков объекта выбраны столбцы нормированной гистограммы распределения по цветовому тону Hue (количество столбцов – 100). Такой подход позволяет учесть все изображения томата вне зависимости от их количества, а также дискретизировать цвета, имеющиеся на поверхности помидора и использовать информацию о частоте появления конкретного оттенка цвета. Также, в качестве признаков использованы медианы значений по компонентам Saturation и Value.

В качестве классификатора была разработана архитектура полносвязной нейронной сети, подробное описание которой будет проведено в следующих разделах.

Анализ выборки. На рис. 5 приведены графики данных гистограмм. Значения цветового тона лежат в диапазоне от 0 до 360, которые были нормированы и приведены к диапазону 0-1. В скобках у каждого класса обозначено количество томатов, на основе которых была построена гистограмма. Суммарное количество целевых объектов – 1094.

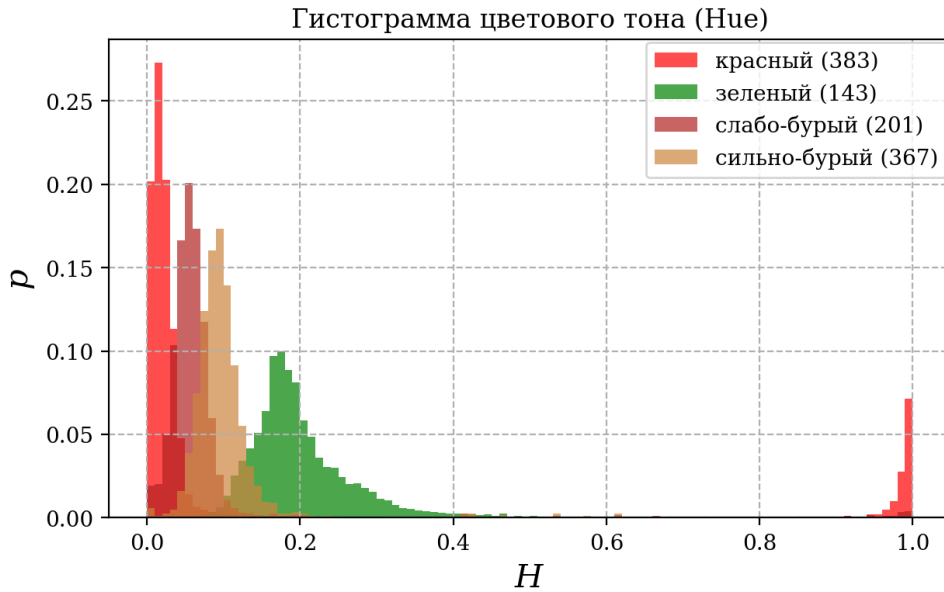


Рис. 5. Анализ набора данных

В табл. 1 приведены данные о межклассовом пересечении гистограмм распределений цветового тона. Наибольшее пересечение наблюдается между классами сильно-бурый/слабо-бурый и красный/сильно-бурый.

Таблица 1

Пересечение гистограмм классов

Классы	Пересечение, %
Красный/зеленый	2
Красный/сильно-бурый	29
Красный/слабо-бурый	7
Зеленый/сильно-бурый	6
Зеленый/слабо-бурый	19
Сильно-бурый/слабо-бурый	40

Стоит отметить, что не все интервалы в диапазоне возможных значений компоненты H (рис. 6) равнозначны применительно к текущей задаче.

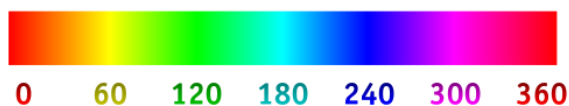


Рис. 6. Шкала Hue

Так, например, цветовые тона голубого, синего и пурпурного имеют минимальные значения эмпирической вероятности, рис. 4, так как анализируемый набор данных содержит томаты, цветовое разнообразие, которых ограничено. По этой причине, при обучении использованы

данные не всех 100 столбцов гистограммы распределения цветового тона, а 61, рис. 7. Общее количество признаков (с учетом медиан по Saturation и Value) 63.

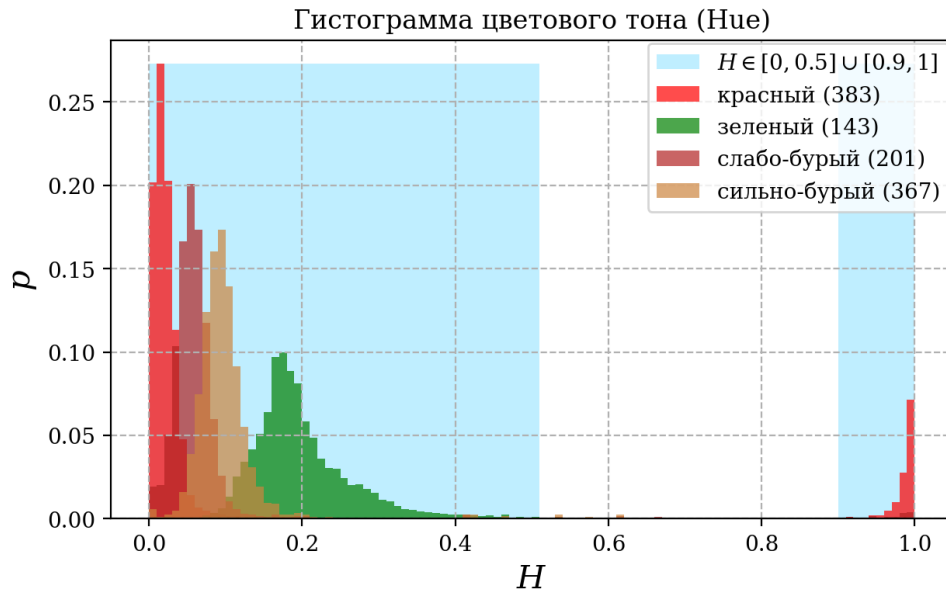


Рис. 7. Используемые столбцы гистограммы (обозначены голубым)

Нейронная сеть

Для решения поставленной задачи была разработана нейронная сеть, представляющая собой многослойный перцептрон, архитектура которого приведена на рис. 8. Количество обучаемых параметров нейронной сети – 1196.

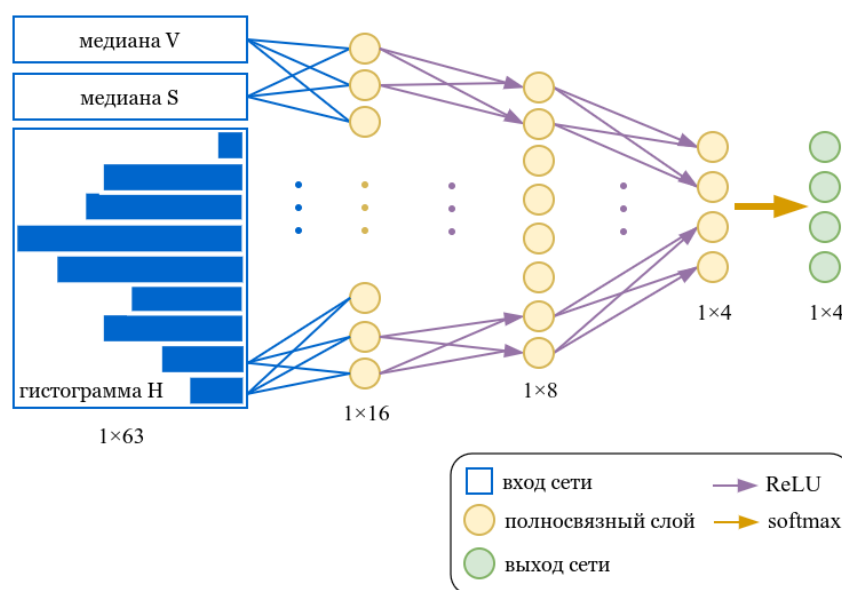


Рис. 8. Архитектура сети

Обучающая выборка объемом в 1094 объектов разделена на тренировочный и тестовый наборы в соотношении 75% и 25% и составили 820 и 274 томата, соответственно.

В качестве функции потерь была использована многоклассовая перекрестная энтропия. Для обучения была использована следующая стратегия обучения: оптимизатор Adam, batch size – 64, количество эпох 35, скорость обучения (learning rate) изменялась в соответствии с расписанием (stepLR) рис. 9.

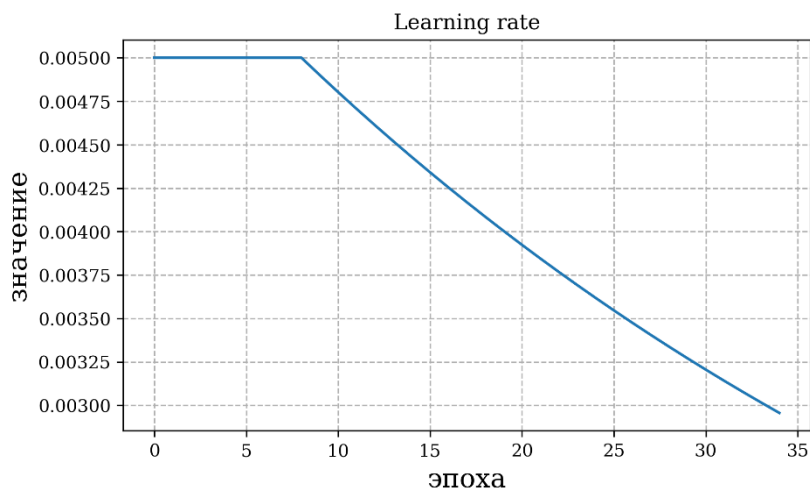


Рис. 9. Расписание learning rate

Результаты обучения. Для оценивания качества полученных моделей использовалась метрика F1. С целью повышения устойчивости полученных результатов было произведено 10 повторных запусков нейронной сети с различной начальной инициализацией. По результатам повторных запусков отбиралась наиболее точная модель и эпоха по метрике F1. Результаты полученного решения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Точность решения

Набор/оценка	CE Loss	F1 score
Тренировочный	0.917	0.877
Тестовый	0.897	0.934

Результирующая точность на тестовой выборке достигает 0.934.

Проведен анализ ошибок классификации, на основе которого составлена матрица ошибок (см. рис. 9). По полученным результатам можно заметить, что наибольшее количество ошибок приходится на пары классов: сильно-бурый/красный и сильно-бурый/слабо-бурый классы. Полученные ошибки согласуются с пересечением классов,

представленным в таблице 1. Таким образом, возникает и актуализируется задача калибровки цвета, с целью возвращения истинной цветовой композиции.

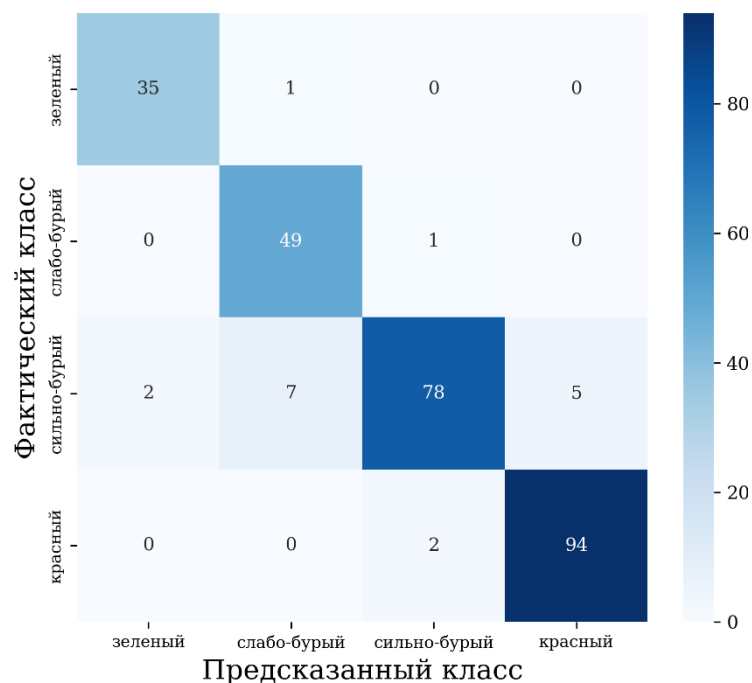


Рис. 10. Матрица ошибок

Заключение. В представленной работе рассмотрена проблема классификации томатов по спелости. Предложенный подход заключается в аппроксимации плотности распределения $p(x, y)$ спектральных характеристик объектов и меток классов спелости с использованием многослойной полносвязной нейронной сети. Результирующая точность полученного решения достигает 0.934 по метрике F1.

Основным ограничением данной работы является объем доступных данных. По этой причине проведение дальнейшего исследования требует увеличения выборки.

Последующие исследования будут направлены на модификацию полученного решения с целью повышения качества и устойчивости, исследование возможности применимости других моделей машинного и/или глубокого обучения и применению к исходным данным алгоритмов калибровки цвета.

Библиографический список

1. Mesa, A.R. Multi-input deep learning model with RGB and hyperspectral imaging for banana grading / A. R. Mesa, J. Y. Chiang // Agriculture. – 2021. – Vol. 11, No. 8. – P. 687.

2. Septiarini, A. Machine vision for the maturity classification of oil palm fresh fruit bunches based on color and texture features / A. Septiarin, A. Sunyoto, H. Hamdania et al. // *Scientia Horticulturae*. – 2021. – Vol. 286. – P. 110245.
3. Cho, B.H. Potential of Snapshot-Type Hyperspectral Imagery Using Support Vector Classifier for the Classification of Tomatoes Maturity / B.H. Cho, Y.H. Kim, K.B. Lee et al. // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, No. 12. – P. 4378.
4. Kumar, S.D. A microcontroller based machine vision approach for tomato grading and sorting using SVM classifier / S.D. Kumar, S. Esakkiraja, S. Bama, B. Keerthiveena // *Microprocessors and Microsystems*. – 2020. – Vol. 76. – P. 103090.
5. De Luna, R.G. Tomato growth stage monitoring for smart farm using deep transfer learning with machine learning-based maturity grading / R. G. De Luna, E. P. Dadio, A. A. Bandala, R. R. P. Vicerra // *AGRIVITA, Journal of Agricultural Science*. – 2020. – Vol. 42, No. 1. – P. 2436.
6. Bautista, J. F. Automated Sorter and Grading of Tomatoes using Image Analysis and Deep Learning Techniques / J. F. Bautista, C.D. Oceña, M.J. Cabrerros, S. P. L. Alagao // 2020 IEEE 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM). – IEEE, 2020. – P. 1–6.
7. Das, P. Automated tomato maturity grading system using CNN / P. Das, J. P. S. Yadav // 2020 International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC). – IEEE, 2020. – P. 136–142.
8. Cheng, H.K. Cascadepsp: Toward class-agnostic and very high-resolution segmentation via global and local refinement / H.K. Cheng, J. Chung, Y.W. Tai, C. K. Tang // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2020. – P. 8890–8899.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ МЕДИЦИНСКИХ МАСОК НА ЛИЦАХ ЛЮДЕЙ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ ПО ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЯ

О.А. Милосердов, А.В. Макаренко

Предложен комплексный подход к решению задачи распознавания средств индивидуальной защиты на примере медицинских масок в сложных условиях съемки с камер наблюдения на предприятии. Решение представляет собой вычислительный конвейер на основе нейросетевого детектора YOLOX, системы трекинга ByteTrack и нейросетевого классификатора на основе легковесной CNN. Достигнуто качество по метрике $F1=0.86$.

Ключевые слова: нейронные сети, детектирование, классификация, трекинг, оценка поз.

Зачастую люди пренебрегают требованиями безопасности по забывчивости или умышленно, поэтому контроль ношения и правильности одевания средств индивидуальной защиты (СИЗ) уже давно является актуальной задачей для множества промышленных предприятий и медицинских учреждений. Существуют различные виды СИЗ: Респираторы и маски используются для защиты органов дыхания и являются одними из самых распространенных СИЗ, каски – обязательны для защиты головы, специализированные очки защищают глаза, перчатки и специальные костюмы защищают от агрессивной среды. Начало пандемии COVID-19 обострило необходимость контроля ношения СИЗ, теперь медицинские маски и перчатки стали обязательны для посещения любых общественных мест и организаций.

Существующие методы автоматизированного мониторинга соответствия требованиям СИЗ можно в целом разделить на два типа: на основе датчиков и на основе методов компьютерного зрения, которые, в свою очередь, также бывают несколько видов. В данной работе мы сфокусируемся на современных подходах, основанных на обработке методами глубокого обучения видеоданных, поступающих из систем машинного (охранного) зрения.

В работе [1] предлагается метод, который использует преимущества комбинации глубокого обучения и локального бинарного шаблона (LBP) для распознавания лица в маске с использованием RetinaFace. Кроме того, авторы извлекают локальные признаки бинарного паттерна из областей глаз, лба и надбровных дуг лица в маске и объединяют их с признаками, полученными от RetinaFace, в единую структуру для распознавания лиц в

масках. Авторы предлагают свой датасет COMASK20, в котором набрано порядка 300 объектов. В результате получены результаты распознавания 87% по F_1 мере в наборе данных COMASK20 и 98% по F_1 мере в наборе данных Essex. В работе [2] авторы используют широко распространенную нейронную сеть ResNet-50 для обучения классификатора, определяющего наличие маски на лице. Использование общедоступного датасета “Real-world masked face recognition dataset” (RMFRD) из [3], в котором содержатся 5000 лиц 525 человек в масках и 90 000 лиц без масок позволило достичь качества классификации $F_1 = 0.897$ на лицах без маски и $F_1 = 0.4473$ на лицах с маской.

Основным недостатком подобных работ [1–4] является отсутствие комплексного подхода к распознаванию наличия масок на лицах людей, а также достаточно «комфортные условия» в которых производится тестирование моделей. В работах предлагаются подходы к обучению классификаторов наличия маски, и используются данные с уже детектированными лицами, однако забывается о проблемах с детектированием и отслеживанием лиц.

Помимо отсутствия комплексного подхода, в работах используются искусственно полученные (или даже синтезируемые, например, в датасете Essex) данные с идеальными ракурсами съемки, освещением и расположением объектов съемки, с отсутствием смаза, расфокусировки и шумов на изображении. Однако, при попытке использования подобных решений в реальной системе по определению масок на лицах, есть риск столкнуться с большим количеством ошибок, ввиду изменения и усложнения условий съемки (освещение, угол, ракурс, масштаб, наличие воротников, и так далее).

В качестве примера работы с комплексным подходом к решению поставленной задачи, можно привести работу [5], где представлены три подхода для проверки соответствия работников СИЗ, основанные на использовании сверточных нейронных сетей (CNN), а частности YOLO-v3 в качестве детектора и VGG-16, ResNet-50 и Xception в качестве классификаторов, собранных в байесовскую структуру. В первом подходе алгоритм обнаруживает рабочих, шляпы и жилеты, а затем модель машинного обучения проверяет, правильно ли каждый обнаруженный рабочий носит шляпу или жилет. Во втором подходе алгоритм одновременно обнаруживает отдельных работников и проверяет соответствие СИЗ. В третьем подходе алгоритм сначала обнаруживает только рабочих на входном изображении, которые затем обрезаются и классифицируются классификаторами на основе CNN. Отличительная особенность работы – это обучение на собственном наборе данных Pictor-v3, который содержит около 1500 аннотированных изображений и около 4700 экземпляров рабочих, одетых в различные комбинации компонентов

СИЗ. Показано, что второй подход обеспечивает наилучшую производительность (среднюю точность mAP 72,3%) и хорошую скорость на уровне в 11 кадров в секунду. Однако первый подход является самым быстрым среди всех и может обрабатывать 13 кадров в секунду при 63,1% mAP.

Также стоит выделить работу [6], в которой комплексно решаются три задачи: подсчет числа людей в кадре, соблюдение социальной дистанции и определение наличия маски. Собран датасет размером более 7000 лиц на основе камер PUC CCTV с различными условиями съемки. Для создания датасета автор использует нейронную сеть для оценки позы HRNet, с помощью которой получает выделенные области с головой человека. На основе полученного датасета автор обучает нейросетевой классификатор с использованием подхода ViT, точность которого достигает порядка 90%.

В данной работе предлагается комплексный подход к решению задачи распознавания наличия СИЗ на персонале предприятия на примере медицинских масок. Предлагается подход к созданию датасета для обучения детектора на основе YOLOX с помощью предобученной нейронной сети для оценки поз AlphaPose. Обученный нейронный детектор на основе YOLOX позволяет эффективно детектировать голову человека, а система трекинга ByteTrack позволяет отслеживать конкретную персону, что дает возможность использовать набор последовательных кадров лица в качестве входа на нейронный классификатор, разработанный на основе легковесной CNN. Подобное решение является комплексным и может быть внедрено на объекты с различными условиями съемки, так как предложенный подход позволяет дообучить набор нейронных сетей под конкретные камеры и условия их функционирования.

Нейросетевой детектор головы человека. Современные глубокие нейронные сети требуют больших наборов данных для обучения. Данных, в существующих открытых источниках, оказывается недостаточно для обучения детектора лиц по двум причинам. Во-первых, могут быть слишком разные условия съемки, например, угол расположения камер, освещение, наличие уличной одежды и так далее. Получается, что вариативность и объем данных в открытых источниках, не позволяет получить полноценное и универсальное решение. Во-вторых, как правило, существующие детекторы нацелены либо на детектирование человека полностью, либо на детектирование только лиц.

Детектирования человеческой фигуры недостаточно для дальнейшей работы, так как при некоторых углах обзора камеры, в детектированный участок может попасть другой человек, и возникнет путаница при дальнейшем выделении лица. Детекторы, обученные на детектирование только лица, как правило, обучались на лицах без масок, что влечет ухудшение качества на лицах в масках. Также, детектирование только лица

не позволяет использовать системы отслеживания (трекинга) в связи с частой сменой ракурса человека.

В связи с перечисленными проблемами возникает необходимость разработки подхода к созданию датасетов для обучения детектора с возможностью подстроиться под различные условия съемки. Оказалось, что для данной задачи отлично подходят нейросети, способные решать задачу оценки позы, например, AlphaPose [7] и OpenPose [8]. Была выбрана AlphaPose, в связи с более гибкой программной реализацией. AlphaPose предобучена на данных с различных камер, снятых при различных условиях съемки, что позволяет использовать ее в данном вычислительном конвейере.

В качестве основной выборки данных для обучения и тестирования были использованы видео данные с 20-ти камер наблюдения на предприятии. Камеры имеют вариативные углы обзора, расположены в различных условиях освещения, а также имеют различный масштаб съемки. Данные взяты за несколько полноценных дней съемки за рабочее время с 8 до 21 часов, что позволило получить кадры как в дневном, так и в ночном режиме. Видеофрагменты также выбраны при различных погодных и климатических условиях, что позволяет охватить людей от момента, когда они в зимних куртках и капюшонах, до летней одежды: футболки, кепки и так далее. Ни один из общедоступных наборов данных не имеет характеристик близких к вышеупомянутым.

В качестве нейросетевого детектора используется современная нейронная сеть YOLOX [9], которая является усовершенствованной (по качеству и скорости работы) версией последних поколений сетей серии YOLO (You Only Look Once), показывающих высокие результаты в области трекинга. YOLOX обучается с нуля на полученном с помощью AlphaPose датасете.

В качестве трекера используется подход ByteTrack [10], основной отличительной особенностью которого является отслеживание всех областей детекции (detection box), вне зависимости от их метрик. Подобный подход позволяет быстро и качественно отслеживать объекты на долгом временном промежутке, что и необходимо для данной задачи. Примеры работы комбинации YOLOX+ ByteTrack на видео вне домена обучения представлены на рис. 1. Несмотря на отличные от обучающей выборки углы обзора камеры и условия съемки, связка YOLOX+ ByteTrack дает неплохой результат вне зависимости от того, в маске человек или нет.

Использование нейронной сети для оценки поз для задачи детектирования оказывается не эффективным, в связи с трехкратным проигрышем по скорости работы (YOLOX 20 кадров в секунду против 60 у AlphaPose), так как в большинстве сетей для оценки поз используется все тот же детектор.



Рис. 1. Примеры работы связки YOLOX+ByteTrack

Обучение нейросетевого классификатора. Первые попытки обучения нейросетевого классификатора на вход которого подавался один кадр, показали довольно низкие результаты по качеству функционирования, в связи с этим было принято решение подавать на вход несколько последовательных кадров. На выходе связки YOLOX и ByteTrack получаем последовательность кадров (15 кадров в секунду) для одной персоны, далее трек. В качестве входа на нейросетевой классификатор подается 8 кадров – минитрек, соответствующий 1 секунде, таким образом нейросеть получает больше информации об объекте. Примеры минитреков из полученной выборки представлены на рисунке 2 (лица закрыты для соблюдения конфиденциальности).



Рис. 2. Примеры мультитрека из 8 кадров

Датасет разбит на 4 класса: «Не лицо», «Маска есть», «Маски нет» и «Наличие маски не определено». В класс «Не лицо» вошли минитреки, где на всех кадрах нет признаков лица (нос, глаз, рот и т.д.). В класс «Маска есть» вошли минитреки, где на лице есть наличие маски (безотносительно правильности ее ношения). В класс «Маски нет» вошли минитреки, где хотя

бы на одном кадре с лицом отсутствует маска на лице. Всего датасет представлен более чем 129 000 минитреками. Датасет разбит на две выборки: обучающая и валидационная. Разбиение проводилось в соответствии с датой съемки и номером камеры для исключения протечки данных. Сводная табл. 1 показывает, что в датасете наблюдается дисбаланс классов.

Таблица 1

Сводная таблица по классам и обучающей и тестовой выборке

Название класса	Обучающая выборка	Валидационная выборка	Всего
Маска есть	32494	7884	40378
Маски нет	13669	3364	17033
Не лицо	55224	16052	71276
Наличие маски не определено	448	112	560
Всего	101835	27412	129247

Типичное решение для классификации изображений строится на основе трех последовательных слоев: сверточный слой – Conv2D, пакетная нормализация – BatchNorm, функция активации – ReLu или LeakyRelu. Назовем такую последовательность ячейкой (см рисунок 3а). В данной работе мы заменили свертку Conv2D на SeparableConv2D [11], которая состоит из двух шагов. Первая часть SeparableConv2D — это пространственная свертка по глубине, которая действует отдельно на каждый входной канал. Этот шаг уменьшает количество операций и экономит вычислительную мощность. Вторая часть — точечная свертка, предназначенная для микширования выходных каналов.

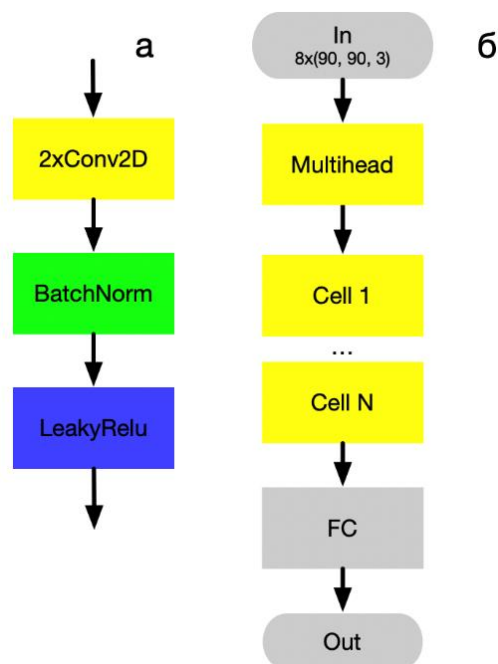


Рис. 3. Архитектура сверточной нейронной сети

В данной работе на вход нейронной сети одновременно подаются 8 кадров, поэтому для предобработки используется мультиголовая подсеть с общими весами (Multihead), которая состоит из 3-х последовательно соединенных ячеек. Затем ячейки соединяются в последовательности (между ячейками может быть встроен слой субдискретизации – MaxPooling), чтобы сформировать экстрактор признаков нейронной сети. На выходе нейронной сети, после использования операции глобального сжатия (global average pooling) идет полносвязный слой с 4 выходами (см. рисунок 3б). Отличительной особенностью такой архитектуры является ее малый размер (41 460 весов), что позволяет имплементировать ее в мобильных роботов.

Обучение производилось в течение 200 эпох с использованием стратегии понижения скорости обучения (с 0.001 до 0.00001). В качестве оптимизатора был выбран Adam. Размер минибатча составил 1500 экземпляров. В качестве функции ошибок была выбрана взвешенная кроссэнтропия. Для улучшения устойчивости нейронной сети обучение производилось с инъекцией нормального шума в результирующий вектор признаков. Это позволило стабилизировать процесс обучения, а также немного повысить качество функционирования сети.

Результат обучения нейронной сети показан на рисунке 4, взвешенная F_1 мера составила 0.86. Согласно матрице ошибок, класс «Наличие маски не определено» ни разу не определен правильно. Это связано в первую очередь с малым количеством данных в обучающей выборке. Во вторую очередь, согласно анализу матрицы ошибок и визуальному анализу ошибок, нейронная сеть большую часть валидационных данных относит к классу «Не лицо» в силу весьма смазанных кадров, которые разметчиками были определены как лицо. Визуальный анализ ошибок показал, что часть ответов нейронной сети оказалась верной, и в разметке допущены ошибки.

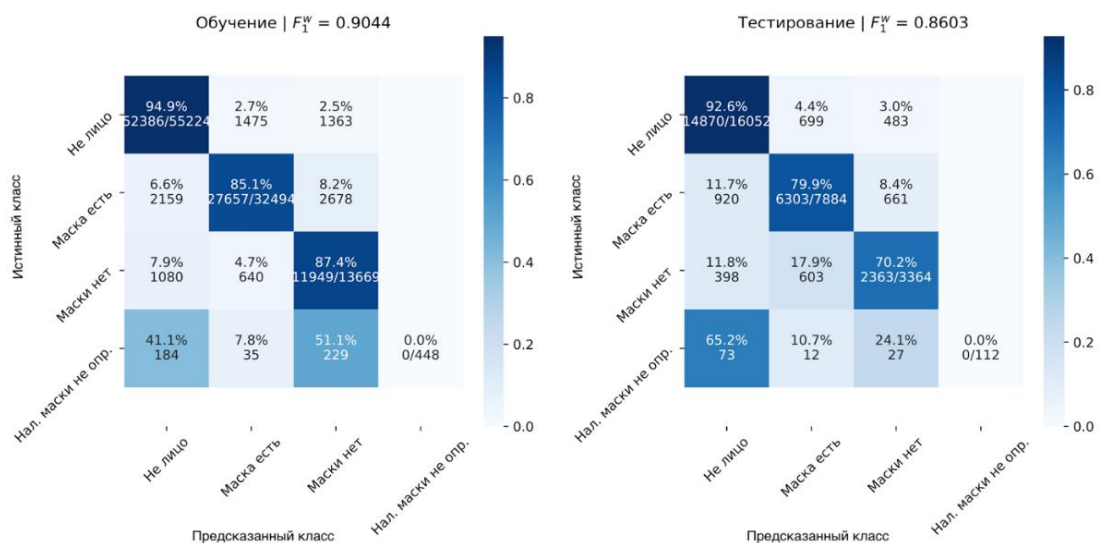


Рис. 4. Матрица ошибок нейронного классификатора

Были предприняты попытки учитывать дисбаланс классов и обучать нейронную сеть минипакетами данных с равномерно распределенными классами, однако подобный подход показал схожее качество или ниже.

Для улучшения качества работы нейронного классификатора в дальнейшем будет произведено увеличение обучающей выборки по малочисленным классам, так как прослеживается четкая зависимость качества классификации от размера обучающей выборки.

Заключение. В работе предложен комплексный подход к решению задачи распознавания СИЗ на примере медицинских масок. Вычислительный конвейер состоит из связки нейросетевого детектора YOLOX, трекера ByteTrack и нейросетевого классификатора, основанного на легковесной CNN. Предобученная нейронная сеть для оценки поз AlphaPose используется для создания датасета для обучения детектора YOLOX детектированию головы человека. Создан и размечен датасет с более чем 129 000 минитреками, который разбит на 4 класса для решения задачи определения наличия маски на лице человека. Трекер ByteTrack позволяет отследить конкретного человека на протяжении его нахождения в зоне видимости камеры, что позволяет использовать набор 8ми последовательных кадров на входе обученного нейросетевого классификатора. Комплекс проделанных работ позволил решить поставленную задачу и обучить нейросетевой классификатор с качеством $F_1 = 0.86$. В дальнейшем планируется расширение обучающей выборки и выравнивание дисбаланса в классах. Также, в планах обучение нейросетевого классификатора для определения правильности ношения маски, что является более сложной и не менее актуальной задачей.

Библиографический список

1. Vu, H.N. Masked face recognition with convolutional neural networks and local binary patterns / H.N. Vu, M.H. Nguyen, C. Pham // Applied Intelligence. – 2022. – Vol. 52, No. 5. – P. 5497–5512.
2. Mandal, B. Masked face recognition using resnet-50 [Электронный ресурс] / B. Mandal, A. Okeukwu, Y. Theis. – arXiv.org, 2021. – Дата обновления: 19.04.2021. – URL: <https://arxiv.org/abs/2104.08997> (дата обращения: 29.05.2022).
3. Wang, Z. Masked face recognition dataset and application [Электронный ресурс] / Z. Wang, G. Wang, B. Huang et al. – arXiv.org, 2020. – Дата обновления: 03.03.2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2003.09093> (дата обращения: 29.05.2022).
4. Hariri, W. Efficient masked face recognition method during the covid-19 pandemic / W. Hariri // Signal, image and video processing. – 2022. – Vol. 16, No. 3. – P. 605–612.
5. Nath, N.D. Deep learning for site safety: Real-time detection of personal protective equipment / N.D. Nath, A.H. Behzada, S.G. Paal // Automation in Construction. – 2020. – Vol. 112. – P. 103085.

6. Cota, D.A.M. Monitoring COVID-19 prevention measures on CCTV cameras using deep learning [Электронный ресурс] / D.A.M. Cota. – webthesis.biblio.polito.it, 2020. – Дата обновления: 06.10.2020. – URL: <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/15970> (дата обращения: 29.05.2022).
7. Fang, H.S. Rmpe: Regional multi-person pose estimation / H.S. Fang, S. Xie, Y.W. Tai et al. // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. – IEEE, 2017. – P. 2334–2343.
8. Cao, Z. Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields / Z. Cao; T. Simon; S.E. Wei et al. // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – IEEE, 2017. – P. 7291–7299.
9. Ge, Z. Yolox: Exceeding yolo series in 2021 [Электронный ресурс] / Z. Ge, S. Liu, F. Wang, Z. Li et al. arXiv.org, 2021. – Дата обновления: 06.08.2021. – URL: <https://arxiv.org/abs/2107.08430> (дата обращения: 29.05.2022).
10. Zhang, Y. Bytetrack: Multi-object tracking by associating every detection box [Электронный ресурс] / Y. Zhang, P. Sun, Y. Jiang et al. – arXiv.org, 2022. – Дата обновления: 07.04.2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2110.06864> (дата обращения: 29.05.2022).
11. Sifre, L. Rigid-motion scattering for texture classification [Электронный ресурс] / L. Sifre, S. Mallat. – arXiv.org, 2014. – Дата обновления: 07.03.2014. – URL: <https://arxiv.org/abs/1403.1687> (дата обращения: 29.05.2022).

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ КРЕДИТНОЙ ЗАЯВКИ БАНКОМ

К.Ю. Орлова, А.М. Абрамов

В статье предлагается подход к оптимизации процесса обработки кредитных заявок, который состоит в том, что потенциально неплатежеспособные заявки отклоняются автоматически, что позволяет сократить непроизводительные временные затраты работы менеджеров. Показана модель определения максимальной суммы кредита в зависимости от дохода заемщика. Предложена и апробирована модель оценки эффективности автоматизации процесса обработки кредитной заявки банком.

Введение

Рассмотрим модель процесса обработки банком заявок клиентов на ипотечный кредит. Заявка клиента содержит сведения о стоимости жилья, на приобретение которого берется кредит, о желаемой сумме и сроке кредита, а также о ежемесячном доходе клиента. При этом предоставленные сведения позволяют на основании математической модели рассчитать максимально возможную сумму кредита, которую банк может предоставить клиенту, и определить, может ли быть удовлетворена заявка.

Оценим эффективность автоматизации процесса обработки кредитных заявок, при котором менеджерами будут рассматриваться только заявки потенциально платежеспособных клиентов, которые банк может удовлетворить, а заявки, запрашивающие сумму больше максимально возможной, будут отклоняться автоматически, при этом клиенту может быть рекомендована меньшая сумма или более долгий срок кредита.

Модель оценки временных затрат на обработку данных клиента

Рассмотрим модель обработки данных клиента. Для определения времени T , затрачиваемого на обработку заявок, адекватная следующая формула:

$$T = \frac{S * N}{L} \rightarrow \min,$$

где S – количество заявок на кредит, N – норматив временных затрат на обработку одной заявки, L – численность менеджеров, занимающихся обработкой заявок на кредит.

Норматив временных затрат на обработку заявки клиента, который заведомо является неплатежеспособным, отличается от норматива на обработку заявки, которая является потенциально одобряемой, так как во

время обработки последней менеджеру необходимо анализировать большой объем данных о клиенте, например, размер заработной платы, место работы, его должность, семейное положение.

В таком случае, среднее время на обработку заявок составит:

$$T = \frac{S * (N_{\text{нп}} * \delta_{\text{нп}} + N_{\text{по}} * \delta_{\text{по}})}{L} \rightarrow \min$$

где $N_{\text{нп}}$ – норматив времени на обработку заявки неплатежеспособных претендентов, $N_{\text{по}}$ – норматив времени на обработку потенциально одобряемой заявки, $\delta_{\text{нп}}$ – доля заявок неплатежеспособных претендентов, $\delta_{\text{по}}$ – доля потенциально одобряемых заявок, причем $\delta_{\text{нп}} + \delta_{\text{по}} = 1$.

Введем коэффициенты пропорциональности k_N и k_δ , такие, что:

$$N_{\text{по}} = k_N * N_{\text{нп}}, \delta_{\text{по}} = k_\delta * \delta_{\text{нп}}.$$

То есть, норматив времени на обработку заявки, которая потенциально будет одобрена, в k_N раз выше, чем для заявки, которая не имеет шансов на одобрение. При этом доля первых больше, чем доля последних в k_δ раз. Тогда:

$$T = \frac{S * (N_{\text{нп}} * \delta_{\text{нп}} + N_{\text{по}} * \delta_{\text{по}})}{L} = \frac{S * (N_{\text{нп}} * \delta_{\text{нп}} + k_N * N_{\text{нп}} * k_\delta * \delta_{\text{нп}})}{L}$$

следовательно,

$$T = \frac{S * N_{\text{нп}} * \delta_{\text{нп}} * (1 + k_N * k_\delta)}{L}.$$

Если исключить расходы банка на обслуживание заявок неплатежеспособных клиентов, то временные затраты \tilde{T} составят:

$$\tilde{T} = \frac{S * k_N * N_{\text{нп}} * k_\delta * \delta_{\text{нп}}}{L} = k_N * k_\delta * M.$$

В таком случае эффективность автоматизации будет рассчитываться по формуле:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_\% &= \frac{T - \tilde{T}}{T} * 100\% = \left[\frac{(1 + k_N * k_\delta) * M - k_N * k_\delta * M}{(1 + k_N * k_\delta) * M} \right] * 100\% = \\ &= \left[\frac{1 + k_N * k_\delta - k_N * k_\delta}{1 + k_N * k_\delta} \right] * 100\% = \frac{1}{1 + k_N * k_\delta} * 100\%. \end{aligned}$$

Соответственно, эффективность автоматизации отказа обслуживания заявок неплатежеспособных клиентов продемонстрирует величину снижения временных затрат на обработку кредитных заявок в процентах. Такая автоматизация даст возможность более быстро обрабатывать заявки клиентов, что, в свою очередь, повысит удовлетворенность клиентов услугами банка, то есть, конкурентоспособность банка также повысится.

Более того, задача оптимизации может выражаться не только в экономии времени на обработку входящей информации, но и в сокращении финансовых расходов на персонал. Тогда количество менеджеров, требуемое для обработки S заявок за время T составит:

$$L = \frac{S * (N_{\text{нп}} * \delta_{\text{нп}} + N_{\text{по}} * \delta_{\text{по}})}{T},$$

а при отсутствии необходимости обработки менеджером неплатежеспособной заявки

$$\tilde{L} = \frac{S * N_{\text{по}} * \delta_{\text{по}}}{T}.$$

Тогда при оптимизации процесса обработки заявок банк имеет возможность уменьшить штат менеджеров-андеррайтеров на ΔL сотрудников (ставок):

$$\Delta L = L - \tilde{L} = \frac{S * N_{\text{нп}} * \delta_{\text{нп}}}{T}.$$

В этом случае эффект от внедрения предложенных мер будет связан со снижением затрат на оплату непроизводительного труда:

$$\mathcal{E} = (L - \tilde{L}) * W = \frac{S * N_{\text{нп}} * \delta_{\text{нп}}}{T} * W,$$

где W – средняя заработная плата менеджера-андеррайтера, занимающегося обработкой кредитных заявок.

Эффективность сокращения затрат на персонал будет равняться эффективности сокращения временных затрат и составит:

$$\mathcal{E}_{\%} = \frac{L - \tilde{L}}{L} * 100\% = \frac{1}{1 + k_N * k_{\delta}} * 100\%.$$

Модель расчета оптимального объема кредита

Рассмотрим математическую модель расчета оптимального объема кредита, на основе которой будет приниматься решение об отказе или одобрении заявки клиента:

$$\left\{ \begin{array}{l} I(D, t) = n * t(D) - D \rightarrow \max \\ D \leq D_{\max} = K3 * R \\ t = D * a_{ni} \\ a_{ni} = \frac{i_M * (1 + i_M)^n}{(1 + i_M)^n - 1} \\ t \leq t_{\max} = \min(t_1, t_2) \\ t_1 = y_1 * \text{ЗПЗ}, t_2 = y_2 * \text{ЗПЗ} \end{array} \right. ,$$

где $I(D, t)$ – целевая функция – доход банка; n – срок кредита в месяцах (количество платежей); t – ежемесячные платежи клиента, D – объем ипотечного кредита; D_{\max} – максимальный объем ипотечного кредита с учетом коэффициента ипотечной задолженности; $K3$ – коэффициент ипотечной задолженности [1]; R – стоимость жилья; a_{ni} – коэффициент аннуитета [2, 3]; i – процентная ставка; $i_M = i / 12$ – месячная процентная ставка; ЗПЗ – заработная плата заемщика в месяц; t_{\max} – максимальная сумма ежемесячной периодической выплаты; t_1, t_2 – ограничения на сумму ежемесячной периодической выплаты с учетом ипотечного коэффициента и задолженности, соответственно; y_1 – ипотечный

коэффициент (от 0,3 до 0,5); y_2 – коэффициент задолженности (от 0,55 до 0,65).

Данная модель рассматривает ситуацию погашения кредита посредством равных, аннуитетных платежей [1].

Согласно модели, цель банка при взаимодействии с клиентом состоит в выборе оптимального размера кредита D для максимизации дохода I , который представляет собой сумму процентов по выданному кредиту и рассчитывается как разница между общей суммой клиентских выплат и телом выданного кредита [4, 5].

В силу линейной зависимости ежемесячного платежа от размера кредита, при увеличении объема выданного банком кредита значение целевой функции будет расти, поэтому задача банка состоит в том, чтобы выдать клиенту максимально возможный кредит с учетом ограничений, налагаемых на него и на размер ежемесячного платежа по кредиту.

Оптимальное значение суммы ежемесячных периодических выплат выражается следующим образом:

$$t^o = t_{max}(t_1, t_2).$$

Тогда оптимальный объем кредита определится как

$$D^o = \frac{t^o}{a_{ni}} = t^o * \frac{1 - (1 + i_M)^{-n}}{i_M}.$$

Таким образом, максимальный размер кредита – это современная стоимость потока максимально возможных для заемщика аннуитетных платежей. При этом размер кредита не должен превышать максимальный объем с учетом коэффициента ипотечной задолженности, характеризующего долю стоимости жилья, оплачиваемую за счет ипотечных средств и, как правило, устанавливаемого банками на уровне не менее 85%.

Максимальный уровень процентного дохода определится по формуле:

$$I = n * t(D^o) - D^o = n * t^o - t^o * a_{ni} = t^o * (n - a_{ni}).$$

Предлагаемая модель также позволяет решить задачу расчета минимального срока кредита τ (в годах), на который банк может выдать заемщику требуемую сумму $D_{\text{треб}}$. Поскольку

$$D_{\text{треб}} = t^o * \frac{1 - (1 + i_M)^{-12*\tau}}{i_M},$$

$$1 - \frac{D_{\text{треб}} * i_M}{t^o} = (1 + i_M)^{-12*\tau},$$

следовательно,

$$\tau = -\frac{1}{12} \log_{(1+i_M)} \left(1 - \frac{D_{\text{треб}} * i_M}{t^o} \right).$$

Применение методики оптимизации бизнес-процесса обработки данных клиента. Представим механизм работы методики оптимизации

бизнес-процесса. Проанализируем затраты времени на обработку клиентских заявок до и после внедрения процесса автоматизации.

В табл. 1 приведены значения показателей, которые характеризуют процесс обработки входящих от клиентов данных рассматриваемого банка.

Таблица 1

Показатели бизнес-процесса обработки данных клиентов банка

Численность менеджеров отдела кредитования	267
Среднедневное количество обрабатываемых заявок	15 640

То есть один менеджер в среднем обслуживает около 60 заявок в день.

По результатам опроса, проведенного среди сотрудников, для анализа потенциально одобряемой заявки на кредит требуется в два раза больше времени, чем для анализа заявки клиента, являющегося неплатежеспособным. Доля кредитных заявок, которые подаются неплатежеспособными клиентами, оценивается специалистами отдела приблизительно в 40%.

Тогда параметры модели принимают следующие значения:

$S=15640$ – количество заявок, обрабатываемых менеджерами;

$L=267$ – количество сотрудников;

$\partial_{\text{нп}} = 0,4$ – доля заявок неплатежеспособных клиентов;

$\partial_{\text{по}} = 0,6$ – доля заявок, являющихся потенциально одобряемыми;

$k_N = 2$ – соотношение между затратами времени на анализ потенциально одобряемой заявки и заявки неплатежеспособного клиента;

$k_{\partial} = 1,5$ – соотношение между количеством потенциально одобряемых заявок и заявок неплатежеспособных клиентов.

Необходимо определить другие характеристики модели. Так как

$$T = \frac{S * N_{\text{нп}} * \partial_{\text{нп}} (1 + k_N * k_{\partial})}{L},$$

то

$$N_{\text{нп}} = \frac{T * L}{S * \partial_{\text{нп}} (1 + k_N * k_{\partial})}.$$

Если параметр времени T равен длительности восьмичасового рабочего дня в минутах ($T=480$), то значения среднего норматива времени на обработку одной заявки неплатежеспособного клиента составят $N_{\text{нп}} \approx 5,12$ минут, тогда средний норматив времени на обработку потенциально одобряемой заявки составит $N_{\text{по}} \approx 10,24$ минут.

Время на обработку заявок менеджерами после автоматизации процесса отклонения заявок неплатежеспособных клиентов рассчитывается следующим образом:

$$\tilde{T} = \frac{S * k_N * N_{\text{нп}} * k_{\partial} * \partial_{\text{нп}}}{L} = 360 \text{ (минут)}.$$

Для расчета максимального размера кредита с определенной заданной процентной ставкой, который может быть предоставлен заемщику на требуемый срок необходимо использовать сведения о его месячной заработной плате.

Для подачи заявки на кредит клиенту предлагается заполнить анкету, в которой необходимо указать характеристики запрашиваемого кредита:

– объем кредита (возможная сумма ипотечного кредита – от 300 тыс. до 30 млн. руб.);

– процентная ставка: (7,8% для клиентов с детьми, 8,9% для клиентов, не имеющих детей);

– срок кредита (от 1 до 30 лет);

– первоначальный взнос (не менее 15%);

Информация из анкеты клиента приведена в таблице 2.

Таблица 2

Таблица для сбора данных клиента

Личная информация	Фамилия Имя Отчество	...
	Номер телефона	...
Финансы и стоимость недвижимости	Заработная плата	25000
	Стоимость недвижимости	1 250 000
	Первоначальный взнос	250 000
	Срок кредита	7 лет

В этом случае коэффициент ипотечной задолженности составит:

$$KЗ = \frac{1250000 - 250000}{1250000} * 100\% = 80\%$$

от стоимости приобретаемой недвижимости, что соответствует нормативу.

Исходя из этих данных можно определить максимальный размер кредита, который банк готов выдать заемщику.

Далее рассчитывается количество платежей n , которое соответствует сроку кредита в месяцах: $n = 7 * 12 = 84$ (мес.).

В таком случае ежемесячная ставка по ипотечному кредиту составит:

$$i_m = \frac{i}{12} = \frac{7,8\%}{12} \approx 0,65\%$$

Рассчитаем аннуитетный коэффициент:

$$a_{ni} = \frac{1 - (1 + i_m)^{-n}}{i_m} = \frac{1 - (1 + 0,0065)^{-84}}{0,0065} \approx 64,57.$$

С учетом дохода потенциального заемщика найдем максимальный размер аннуитетного платежа:

$$t_1 = 0,5 * 25000 = 12500 \text{ руб.}, t_2 = 0,55 * 25000 = 13750 \text{ руб.},$$

$$t^0 = t_{max} = \min(t_1, t_2) = 12500 \text{ руб.}$$

В этом случае оптимальный объем кредита равен (2):

$$D^0 = D_{max} = 12500 * 64,57 = 807\,141,15 \text{ руб.}$$

То есть 807 141,15 рублей – это максимальный размер кредита, на который может претендовать клиент.

Соответственно, стоимость жилья R при максимально возможном коэффициенте ипотечной задолженности, составит:

$$R = \frac{D}{KЗ} = \frac{807\,141,15}{0,85} \approx 949\,577,82 \text{ руб.}$$

Для приобретения же жилья, под которое запрашивалась ипотека, заемщик должен внести первоначальный взнос в размере 442 858,85 рублей (35,4%).

При этом значение банковского процентного дохода от предоставления заемщику максимально возможного, т.е. оптимального, кредита будет равно:

$$I = t^0 * (n - a_{ni}) = 12\,500 * (84 - 64,57) = 242\,858,85 \text{ руб.}$$

Таким образом, в рамках рассматриваемого примера банк готов выдать в качестве кредита заемщику только около 800 тысяч рублей при величине запрашиваемой суммы 1 млн рублей. Тогда заявка этого заемщика будет отклонена автоматически.

Далее необходимо рассчитать минимальный срок, на который заемщик может получить запрашиваемую сумму кредита:

$$\begin{aligned} \tau &= -\frac{1}{12} \log_{(1+i_m)} \left(1 - \frac{D_{\text{треб}} * i_m}{t} \right) = \\ &= -\frac{1}{12} \log_{1,0065} \left(1 - \frac{1 \text{ млн} * 0,65\%}{12500} \right) \approx 9,44. \end{aligned}$$

Таким образом, банк может предложить заемщику или кредит на сумму 800 тысяч рублей, или кредит в объеме требуемой клиентом суммы в 1 млн рублей не на семь лет, а на девять с половиной.

Оптимизация обработки входящих от заемщика данных, которая заключается в автоматизации выдвигения отказа неплатежеспособного клиенту, то есть такого, доход которого не позволяет получить кредит в запрашиваемом объеме, позволит снижать временные затраты, используемые на обработку входящих данных от заемщиков.

Эффективность предложенных мер составит:

$$\mathcal{E}_\% = \frac{1}{1 + k_N * k_\partial} * 100\% = 25\%$$

То есть, внедренные меры помогут снизить затраты времени на анализ анкет претендентов на кредит на 25%, либо сократить штат андеррайтеров на 25% при сохранении существующего потока заявок.

При сохранении штата освободившееся время сотрудники могут затратить на дополнительное рассмотрение $\Delta S_{\text{по}}$ потенциально одобряемых заявок:

$$\Delta S_{\text{ПО}} = \frac{L * \Delta T}{N_{\text{ПО}}} = 3128.$$

В случае если задачей оптимизации бизнес-процесса обработки и анализа данных является сокращение штата сотрудников, необходимых для обработки входящих заявок, то внедрение механизма автоматизации отказа клиентам, которые являются недостаточно платежеспособными, даст возможность сократить ΔL ставок менеджеров:

$$\Delta L = \frac{S * N_{\text{НП}} * \partial_{\text{НП}}}{T} = 67,75.$$

Месячная зарплата менеджера-андеррайтера отдела ипотечного кредитования в среднем составляет 40 т.р., поэтому экономический эффект от автоматизации в условиях сокращения персонала будет составлять

$$\mathcal{E} = \Delta L * W = 2 \text{ млн } 670 \text{ тыс. рублей.}$$

Таким образом, предлагаемая модель оптимизации бизнес-процесса обработки входящего потока данных о клиенте дает возможность банкам повысить эффективность работы, что позволит справляться с растущим количеством заявок на ипотечный кредит или оптимизировать затраты на персонал.

Библиографический список

1. Оценка стоимости недвижимости / С.В. Грибовский, Е.Н. Иванова, Д.С. Львов, О.Е. Медведева — М.: ИНТЕРРЕКЛАМА, 2003. — 704 с.
2. Бланк, И.А. Инвестиционный менеджмент. Учебный курс / И.А. Бланк. — К.: Эльга-Н, Ника-Центр, 2002.
3. Гераськин, М. И. Модели инвестиционного планирования / М.И. Гераськин, О.А. Кузнецова. — Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2020. — 100 с.
4. Орлова, К.Ю. Моделирование взаимодействия участников банковской системы с учетом рисков / К. Ю. Орлова, Д. Ю. Иванов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2013. — Т. 15. — № 6-4. — С. 1074-1077. —
5. Гераськин, М.И. Моделирование оптимальной стратегии потребительского кредитования банка / М.И. Гераськин, В.В. Манахов // Экономические науки. — 2015. — № 133. — С. 53–60. —

О СОЗДАНИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СОЗДАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ РЕЦЕПТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SMART-КОНТРАКТОВ

А.Д. Овсяницкий, М.А. Сипатов, Р.Р. Салахиев

Рассмотрено понятие Smart-контракта. Проанализированы достоинства и недостатки централизованных и децентрализованных информационных систем. Представленная созданная авторами информационная система управления процессом создания и реализации медицинских рецептов с использованием smart-контрактов.

Доказано, что использование подобных систем обеспечивает анонимность, невзаимозаменяемость, отслеживаемость всех процессов и уменьшает транзакционные издержки.

Ключевые слова: smart-контракт, медицинский рецепт, транзакции, информационная система.

Ритм жизни в настоящее время постоянно ускоряется. Договоры, соглашения и контракты ранее заключались в письменной форме и требовали присутствия людей, заключающих договор.

Заключая соглашения друг с другом, люди и организации принимали на себя обязательства выполнить работы, оказать услуги, передать товары или денежные средства. Однако нередко принятые по договору обязательства нарушались. Потерпевшая сторона для восстановления справедливости обращалась в суд и пыталась добиться восстановления нарушенных прав. Даже в случае восстановления нарушенных прав потерпевшей стороны судом на это уходило много времени, сил и денег.

Смарт-контрактом называется особая программа в блокчейн-сети, выполняемая всеми узлами и помогающая владельцам информации между собой взаимодействовать. Все условия и положения этих контрактов записываются в блочной цепочке. Никто не может обмануть, взломать или подкупить пользователя, нарушив тем самым условия смарт-контракта.

Стороны подписывают умный контракт, используя аналогичные подписанию отправки средств в действующих криптовалютных сетях методы. После подписания сторонами контракт вступает в силу.

Актуальность использования смарт-контрактов заключается в том, что, имея беспрепятственный доступ к объектам контракта, умный контракт отслеживает по указанным условиям достижения или нарушения пунктов и принимает самостоятельные решения, основываясь на запрограммированных условиях.

Таким образом, основной принцип умного контракта состоит в полной автоматизации и достоверности исполнения договорных отношений между людьми.

Умные контракты, основанные на криптографии, способны обеспечивать лучшую безопасность, чем традиционные контракты, основанные на праве, и снизить прочие транзакционные издержки, связанные с заключением договоров и возможных судебных издержек.

Впервые идея смарт-контракта была предложена в 1994 г. Ником Сабо (США) – ученым в сфере информатики, криптографии и права. Он описал смарт-контракт как «цифровое представление набора обязательств между сторонами, включающее в себя протокол исполнения этих обязательств».

Таким образом, смарт-контракт может быть определен как договор между двумя и более сторонами об установлении, изменении или прекращении юридических прав и обязанностей, в котором часть или все условия записываются, исполняются и/или обеспечиваются компьютерным алгоритмом автоматически в специализированной программной среде.

Вопросам создания смарт-контрактов уделяется большое внимание в научной литературе. В частности, в работах [1,2] подробно рассмотрены вопросы функциональной модели смарт-контракта на платформе Ethereum.

Самая распространенная платформа для развертывания смарт-контрактов Ethereum. Однако с быстрым развитием смарт-контрактов количество атак также растет [3,4].

Ethereum гарантирует невозможность изменения конечного состояния сети после выполнения некоторой логики смарт-контракта и его выполнение будет соответствовать

К настоящему времени отсутствует общепринятая классификация смарт-контрактов, но с точки зрения исполнения соглашений могут быть выделены следующие виды смарт-контрактов:

- контроль имущественных отношений – владение и проведение операций с цифровыми активами, включая криптовалюты и токены (Bitcoin, ETH, XRP и другие);
- финансовые сервисы – торговое финансирование, торговля на бирже, участие в аукционах и иное;
- кредитные обязательства – исполнение обязательств по различным формам банковских кредитных продуктов в момент наступления событий;
- социальные сервисы – процедуры проведения голосований, выборов, процессы страхования;
- организация управления доставкой и хранением товаров.

Практика использования смарт-контрактов на сегодняшний день сводится в основном к частичной автоматизации отдельных аспектов соглашений, таких как обмен цифровыми активами, например, обмен денежных средств на имущественные права. Однако, весьма вероятно, что

по мере развития инфраструктуры и платформ на основе технологии распределенных реестров смарт-контракты перестанут быть только дополнением к бумажной версии документа и станут основным гарантом исполнения обязательств сторон при заключении соглашений, обеспечив переход к цифровым контрактам без необходимости их подтверждения бумажными документами [5].

Первой страной в мире, законодательно закрепившей смарт-контракты, стала Республика Беларусь. В Декрете от 21 декабря 2017 года № 8 «О развитии цифровой экономики» были узаконены биржи криптовалют, операторы обмена криптовалют, майнинг, смарт-контракт, блокчейн, токены и т. п. В соответствии с указанным Декретом под смарт-контрактом понимается программный код, предназначенный для функционирования в реестре блоков транзакций (блокчейне) в целях автоматизированного совершения и (или) исполнения сделок либо совершения иных юридически значимых действий. Исходя из буквального толкования определения смарт-контракта, изложенного в Декрете, можно сделать вывод о том, что белорусский законодатель пошел по пути отнесения смарт-контракта к программному коду, который помогает исполнять условия классического договора. Таким образом, это лишь некое условие об особенностях исполнения договора, но не разновидность такого.

В нашей стране с 1 октября 2019 года вступил в силу Федеральный закон от 18.03.2019 N 34-ФЗ, который предусматривает ряд нововведений в ГК РФ. Целью закона является закрепление базовых положений для регулирования рынка новых цифровых объектов экономических отношений (в частности, криптовалюты), а также для совершения и исполнения сделок в цифровой среде. В рамках этого закона в Гражданском Кодексе появились нормы права, соответствующие понятию смарт-контракта.

Среди недостатков централизованных систем можно выделить повышенный риск утечки персональных данных, так в случае какой-либо утечки ее масштаб будет колоссальным ввиду организации системы, проблемы масштабирования: единая система в Москве и Владивостоке с центром в Москве будет иметь значительные проблемы с обменом данных ввиду большой задержки, а также относительно низкую отказоустойчивость. В системах такого рода выход из строя центрального узла обычно влечет к полной потере их работоспособности на время его ремонта.

В то же время децентрализованные системы, которые включают в себя технологию блокчейн лишены многих из этих недостатков. Отказоустойчивость обеспечивается структурой блокчейн, для вывода его из строя или нарушения работы необходим выход из строя порядка половины всех узлов сети. Также в децентрализованной системе задержка в операциях не зависит от какого-либо центра и является примерно

одинаковой для всей сети. Защиту персональных данных обеспечивает повсеместное шифрование данных. Их утечка маловероятна и не может привести к потерям миллионов персональных данных, как это происходит регулярно с сервисами крупных компаний.

Нами создано веб-приложение, позволяющее реализовывать смарт-контракт для возможности получения у врача и реализации в аптеке рецепта на медицинские препараты пациентом.

В России, согласно текущему законодательству, имеется возможность получения медицинского рецепта в электронном виде в рамках единой государственной информационной системы в сфере здравоохранения при помощи заверения электронного документа усиленной квалифицированной электронной подписью медработника, внесенного в особый федеральный регистр. Таким образом в России уже применяются электронные медицинские рецепты, однако они используются в рамках единой централизованной системы, что имеет свои недостатки перед использованием в качестве носителя медицинского рецепта NFT (non-fungible tokens или невзаимозаменяемый токен).

Анализ предметной области позволил выделить следующие функциональные требования:

- приложение должно осуществить выпуск NFT с медицинским рецептом;
- выпущенные NFT должны быть совместимы со стандартом ERC-721 и корректно взаимодействовать со сторонним ПО;
- для каждого типа пользователей приложения должна быть разработана своя версия, реализующая необходимые для него функции.

В процессе выписывания и реализации рецепта имеется 3 основных актера: «Врач», «Пациент», «Аптека». На рисунке 1 показана диаграмма деятельности для всего процесса создания и передачи рецепта, которую должно обеспечивать веб-приложение. Таким образом мы можем сформировать требования к возможностям для каждой версии веб-приложения.

При создании врачом рецепта и его отправке пациенту формируется NFT. NFT с рецептов содержит в себе информацию о лекарстве, сроке своего действия, а также адрес пациента. Это информация не может быть изменена в дальнейшем никем кроме врача, если тот захочет продлить или удалить рецепт. С технической точки зрения важно то, что врач не переводит NFT на свой кошелек, а производит его эмиссию в кошелек пациента.

Когда NFT переходит к пациенту, веб-приложение получает информацию об этом и отображает ее в списке, используя информацию из NFT. Помимо этого, пациент можете перевести данный NFT аптеке что того, чтобы получить лекарство.

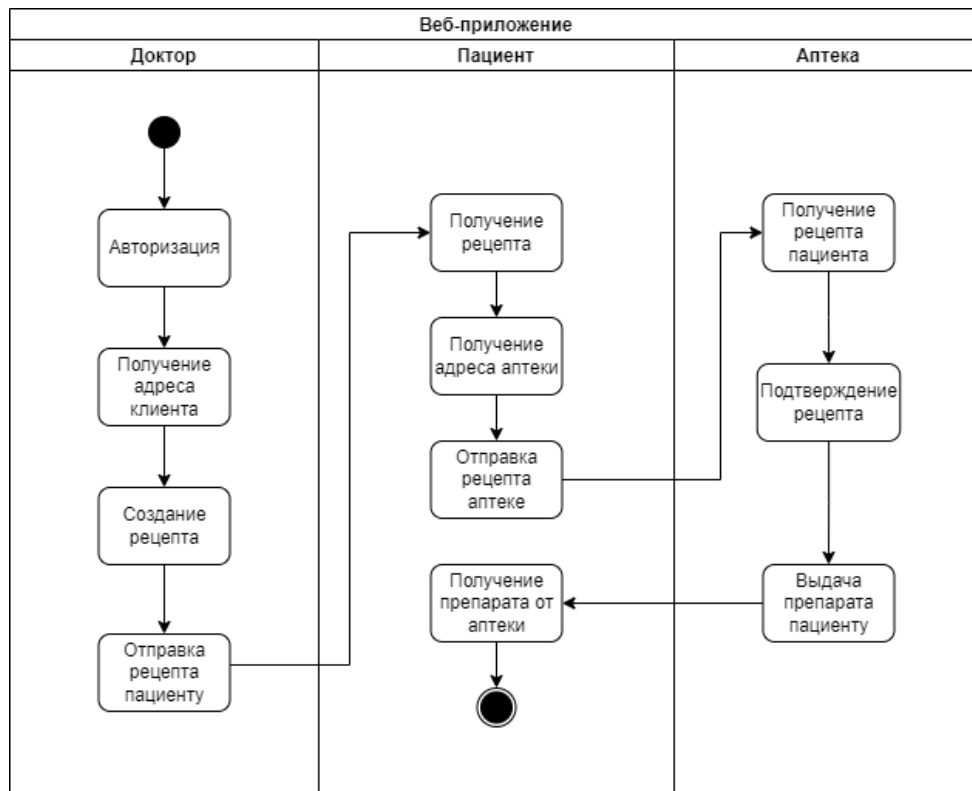


Рис. 1. Диаграмма деятельности для получения рецепта в веб-приложении

Аптека при получении NFT от пациента в первую очередь проверяет то, выпущен ли NFT сертифицированный врачом. На этом исчерпывается взаимодействие аптеки с контрактом.

В качестве основного языка для разработки смарт-контракта был выбран язык Solidity версии 0.8.7, актуальной на данный момент.

Solidity – это новый язык программирования, предназначенный для написания программ, называемых смарт-контрактами, которые могут запускаться виртуальной машиной Ethereum (EVM). Solidity представляет собой совокупность соглашений из сетевых технологий, языка ассемблера и веб-разработки.

Для разработки веб-приложения был использован язык программирования JavaScript, а также библиотеки React, web3.js, Bootstrap. В качестве среды разработки использовалась IDE Visual Studio Code.

В качестве блокчейна, в котором будет располагаться контракт, обеспечивающий выпуск и дальнейшую работу с медицинскими рецептами, была выбран тестовая сеть EVM-совместимого блокчейна BNB Smart Chain. Его преимуществами по сравнению с блокчейном Ethereum является увеличенное быстродействие и бесплатное использование тестовой сети.

Заключение. Создание информационной системы доказала возможность внедрения и использования smart-контрактов для управления процессом создания врачом медицинского рецепта, безопасной передачи

его пациенту и дальнейшей защищенной передачи пациентом рецепта в аптеку.

Доказано, что использование NFT в качестве носителя медицинского рецепта обеспечивает анонимность, невзаимозаменяемость, отслеживаемость всех процессов и уменьшает транзакционные издержки.

Библиографический список

1. Карпычев, В.Ю. Функциональная модель смарт-контракта на платформе Ethereum // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2019. №2 (125). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/funktsionalnaya-model-smart-kontrakta-na-platforme-ethereum> (дата обращения: 27.10.2021).
2. Карпычев, В.Ю. Функциональное моделирование (IDEF0) как метод исследования блокчейн технологии / В.Ю. Карпычев // Труды НГТУ. – 2018. – № 4. – С. 22–32.
3. Алиев, И. А. Уязвимости смарт-контрактов блокчейн-платформы Ethereum // Научные записки молодых исследователей. – 2019. – №3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uyazvimosti-smart-kontraktov-blokcheyn-platformy-ethereum> (дата обращения: 27.10.2021).
4. Liu, J. A Survey on Security Verification of Blockchain Smart Contracts / J. Liu, Z. Liu // IEEE Access. – 2019. Vol. 7. – P. 77894–77904.
5. Овсяницкая, Л.Ю. О трендах развития IT-технологий в 2022 году / Л.Ю. Овсяницкая, А.Д. Овсяницкий // Материалы Всероссийской научно-исследовательской конференции «Перспективные направления взаимодействия бизнеса, образования и культуры». – Челябинск, 2022. – С. 115–118.

РАСПОЗНАВАНИЕ РУКОПИСНЫХ РУССКИХ СЛОВ С ПОМОЩЬЮ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

К.Д. Русаков, М.В. Мамченко

Исследование посвящено задаче распознавания рукописного текста на русском языке на основе моделей глубокого обучения. В работе применена модель глубокой нейронной сети на основе совмещения сверточной нейронной сети и двунаправленных модулей GRU. В результате применения данной архитектуры достигнуты значения коэффициент ошибок символов 0,1 (CER) и коэффициент ошибок слов 0,37 (WER) для валидационного набора данных. Разработанная модель с совместным использованием сверточных слоев и модулей рекуррентных блоков Bi-GRU позволяет решать задачу оптического распознавания рукописных текстов на русском языке с точностью, сравнимой с аналогичными значениями, полученными с использованием модели на основе трансформеров и сверточных энкодеров.

Ключевые слова: оптическое распознавание текста, нейронные сети, глубокое обучение, распознавание рукописного текста.

Введение. Распознавание текста – одна из классических задач компьютерного зрения, являющаяся до сих пор актуальной. Одним из важнейших направлений распознавания текста является оцифровка старых документов, книг и рукописей, подверженных деградации со временем. Направление оптического распознавания рукописного текста получила дальнейшее развитие с появлением глубоких нейронных сетей. Нейронные сети позволили разработчикам использовать функции и алгоритмы, извлеченные из данных, а не созданные вручную. Это упрощает создание моделей оптического распознавания рукописного текста для новых наборов данных и языков. Тем не менее модели оптического распознавания рукописного текста по-прежнему воплощают в своей архитектуре индуктивные предубеждения, предположения и эвристики, относящиеся к предметной области, в отношении макета, размера и ориентации текста.

Обзор существующих решений. На сегодняшний день много научных работ, предлагающих собственные методы, алгоритмы и решения, связанные с оптическим распознаванием рукописного текста. Так, в работе [1] предлагается подход, основанный на сегментации рукописного слова с использованием эвристики и методов машинного обучения. Три комбинации дескрипторов Фурье используются параллельно в качестве векторов признаков. В качестве классификатора используется машина

опорных векторов (SVM). Целью исследования [2] являлось создание эффективной системы распознавания слов, полученной в результате комбинации трех распознавателей рукописного текста. Ключевым компонентом этой гибридной системы являлась скрытая марковская модель, учитывающая комплексные и контекстуальные знания. Для моделирования контекстных единиц был реализован метод привязки состояний, основанный на дереве решений. Деревья решений строятся на основе набора вопросов экспертов о том, как пишутся символы. Авторы в работе [3] представили модель для идентификации сквозного почерка. Модель была основана на архитектуре сетей долгой краткосрочной памяти (LSTM) для распознавания голоса, генерации субтитров к изображениям или перевода текста. Ключевым отличием многомерной сети LSTM является реализация скрытого и явного фокуса. Их основной вклад в идентификацию почерка заключается в автоматизированной транскрипции без предварительной сегментации строк. Кроме того, модель может запоминать порядок чтения и обрабатывать двунаправленные тексты, например, на арабском языке. Авторы провели тесты в популярной базе данных IAM [4], показавшие существенные результаты для выбранной модели. В статье [5] предложена новая архитектура нейронной сети для современного распознавания рукописного текста в качестве альтернативы рекуррентным нейронным сетям на основе LSTM. Модель сверточной нейронной сети и двунаправленного декодера LSTM предсказывала последовательности символов. Целью этого исследования являлось создание общих, многоязычных и многообразных функций с помощью сверточного кодировщика, используя больше данных для обучения. Архитектура также подходила для быстрого обучения на графических процессорах и быстрого декодирования на обычных процессорах. Автор работы [6] показал, что современное автономное распознавание рукописного текста в значительной степени зависит от сетей долговременной многомерной памяти. Это означает, что долгосрочные двумерные зависимости, теоретически представленные многомерными рекуррентными слоями, могут не понадобиться для достижения хорошей точности распознавания, по крайней мере, на нижних уровнях архитектуры. В исследовании представлена альтернативная модель, основанная только на сверточных и одномерных рекуррентных слоях, которые обеспечивают лучшие или сравнимые результаты с одновременным повышением быстродействия. Кроме того, в работе установлено, что использование случайных искажений по мере увеличения синтетических данных во время обучения значительно повышает точность модели. В исследовании [7] предлагается архитектура WCNN-RHMM для автономного распознавания рукописного китайского текста для решения двух ключевых проблем: большого количества китайских иероглифов и

словарного запаса, а также разнообразия стилей письма. Авторы утверждают, что подход, при котором комбинируются скрытые марковские модели, основанные на неконтролируемом обучении, демонстрирует свое превосходство над другими современными подходами.

Исследования оптического распознавания русского текста представлены в работах [8] и [9]. Авторы статьи [8] утверждают, что их работа является первым исследованием в наборе данных НКР [10] – первом открытом датасете в русских и казахских рукописных наборах данных. Авторы разработали модель на основе сверточной нейронной сети, двунаправленной рекуррентной сети и блоков внимания. В исследовании [9] авторы используют ряд моделей, в том числе и обычные сверточные сети, для распознавания отдельных русских букв. Анализируя представленные работы, можно сделать вывод, что задача оптического распознавания рукописного русского текста с требуемой точностью является не до конца изученной и решенной и, следовательно, актуальной.

Предлагаемые подход, модель и алгоритм. Предлагаемая модель будет использовать кириллицу в рукописном виде. Примеры представляют собой обрезанное изображение одномерной последовательности русских букв или цифр. Модель основана на архитектуре сверточной нейронной сети и блоков двунаправленных рекуррентных сетей с небольшим количеством параметров, что обеспечивает высокую скорость распознавания (рис. 1).

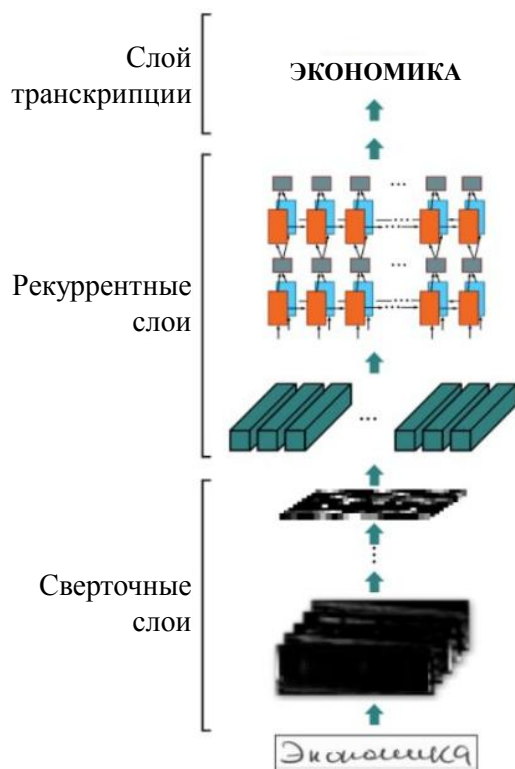


Рис. 1. Архитектура предлагаемой модели

Алгоритм состоит из шести этапов.

1. Предварительная обработка. Включает в себя изменение размера до 50x200, а также добавление аугментации: повороты изображения, артефакты, деформации букв, размытие и внесение других искажений (рис. 2). Подобные деформации позволяют добиться увеличения качества модели и повышения ее устойчивости к зашумлению входных данных.

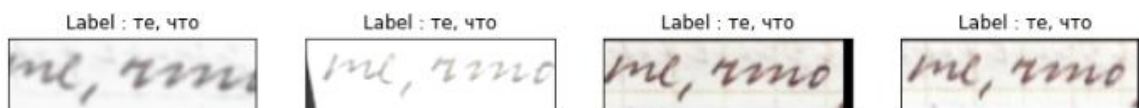


Рис. 2. Примеры аугментации изображений

2. Извлечение характеристик с использованием сверточных слоев. Изображение поступает на вход энкодер, генерирующего векторы признаков. Эти векторы признаков содержат информацию и характеристики, которые описывают входные данные в некотором пространстве. Предлагается к использованию семиуровневая сеть Convolution с использованием MaxPool2d и функции активации ReLU. Кроме того, для уменьшения переобучения применяется слой Dropout в конце сети в полносвязном слое.

3. Обработка полученных векторов рекуррентными блоками Gated Recurrent Unit (GRU). Декодер – двунаправленный CRU [8] RNN – обрабатывает последовательности признаков для предсказания последовательностей букв и цифр. Вектор содержит 256 признаков на временной шаг, и рекуррентная нейронная сеть распространяет информацию через эту последовательность. Выходная последовательность слоя RNN представляет собой матрицу размером 512x96.

4. Расчет потерь с помощью функции CTC потерь [11]. В процессе обучения модель максимизирует вероятность того, что она предсказывает правильную метку. Для этого нужно вычислить условную вероятность $p(Y|X)$. Функция $p(Y|X)$ также должна быть дифференцируемой, чтобы можно было использовать градиентный спуск. Для алфавита A в задаче предсказания последовательности метрика CTC состоит из выходного слоя Softmax с несколькими выходами. Активация первого выхода $|A|$ – вероятность вывода соответствующих меток в определенное время, учитывая входную последовательность и веса сети. Активация дополнительного выхода дает вероятность того, что будет выведена «пустая» метка или метка не будет выведена. Полная последовательность сетевых выходов затем используется для определения распределения по всем возможным последовательностям меток до входной последовательности. Определив алфавит $A' = A \cup blank$, активация y_k^t

выхода сети k в момент времени t интерпретируется как вероятность того, что сеть выведет элемент k слова A' в момент времени t при заданной длине T входной последовательности x . Пусть A'^T относится к множеству последовательностей T над A' . Тогда, если предположить, что выходные вероятности не зависят от вероятностей на другом временном шаге, мы получим следующее условное распределение по $\pi \in A'^T$:

$$p(\pi | x) = \prod_{t=1}^T y_{\pi t}^t. \quad (1)$$

Следующий этап состоит из определения функции «многие к одному» $F: A'^T \rightarrow A^{\leq T}$ из множества путей к множеству $A^{\leq T}$ возможных x меток. В первую очередь необходимо извлечь повторяющиеся метки из путей, а затем пробелы. Вероятность любой $l \in A^{\leq T}$ может быть определена суммированием вероятностей всех путей, описываемых F :

$$p(L | x) = \sum_{\pi \in F^{-1}} p(\pi | x). \quad (2)$$

Эксперимент. В качестве набора данных для эксперимента был выбран открытый датасет кириллического почерка для задач распознавания текста, который состоит из 73830 сегментов рукописных текстов («кропов») на русском языке и разбит на обучающие и тестовые наборы (95% и 5% соответственно). Данные были собраны из открытых веб-источников. Каждый кадр представляет собой изображение выражения на русском языке, состоящее не более чем из 40 символов, написанных от руки (рис. 3).

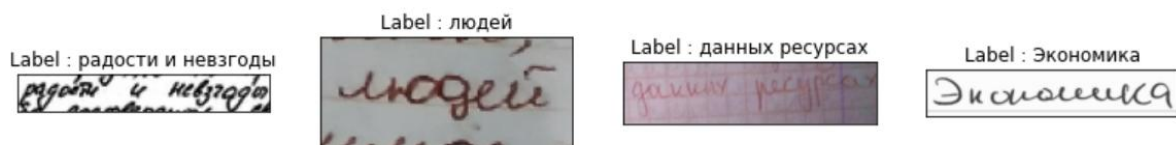


Рис. 3. Примеры аугментации изображений

В процессе обучения (рис. 4) модель минимизировала значение потерь СТС. Была выполнена оптимизация со стохастическим градиентным спуском с базовой скоростью обучения 0,02 и мини-пакетами размером 16. Как видно из графика, после девятой эпохи потери на валидационной выборке начали увеличиваться, что говорит о том, что модель переобучилась. Таким образом, будем использовать веса с девятой эпохи.

Для всех представленных результатов используются стандартные показатели производительности: коэффициент ошибок символов (CER) и коэффициент ошибок слов (WER) [14]. CER определяется как расстояние Левенштейна, которое представляет собой сумму замены символов (S),

вставки (I) и удалений (D), необходимых для превращения одной строки в другую, деленную на общее количество символов (N):

$$CER = \frac{S + I + D}{N}. \quad (3)$$

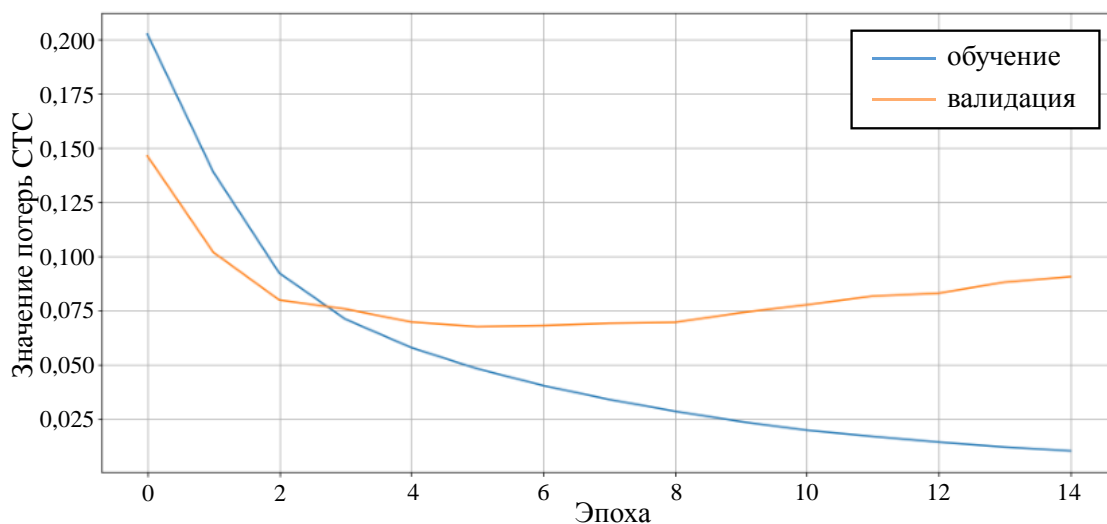


Рис. 4. Примеры аугментации изображений

Аналогичным образом WER рассчитывается как сумма количества замен (S_w), вставок (I_w) и удалений (D_w), необходимых для преобразования одной строки в другую, деленная на общее количество истинных слов (N_w):

$$WER = \frac{S_w + I_w + D_w}{N_w}. \quad (4)$$

В табл. 1 представлены сравнение полученных результатов с использованием предложенной модели и одного из существующих решений, основанного на архитектуре, использующей трансформеры и сверточные энкодеры.

Таблица 1

Сравнительные результаты с аналогичными решениями

Модель	WER	CER
Simple and Efficient Transformer HTR [15]	0,358072	0,083708
CNN, совмещенная с GRU	0,374567	0,102456

Заключение. Из табл. 1 видно, что разработанная модель с предложенной архитектурой, заключающейся в совместном использовании сверточных слоев и модулей рекуррентных блоков Vi-GRU, позволяет решать задачу оптического распознавания рукописных текстов на русском языке с точностью, сравнимой с аналогичными значениями, получаемыми

моделями на основе архитектуры с использованием трансформеров и сверточных энкодеров. Сравнимая точность предложенного решения заключается в сопоставимых значениях коэффициентов ошибок символов (CER) и ошибок слов (WER), полученных с использованием предложенной и эталонной моделей. В дальнейшем планируется усовершенствование архитектуры разработанной модели глубокого обучения для повышения точности и уменьшения значений коэффициентов ошибок CER и WER.

Библиографический список

1. Gupta, A. Offline handwritten character recognition using neural network / A. Gupta, M. Srivastava, C. Mahanta // IEEE International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE). – 2011. – P. 102–107.
2. Bianne-Bernard, A.-L. Dynamic and contextual information in hmm modeling for handwritten word recognition / A.-L. Bianne-Bernard, F. Menasri, R.A.-H. Mohamad, C. Mokbel, C. Kermorvant, L. Likforman-Sulem // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2011. – Vol. 33, No. 10. – P. 2066–2080.
3. Bluche, T. Scan, attend and read: End-to-end handwritten paragraph recognition with MDLSTM attention / T. Bluche, J. Louradour, R. Messina // 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). – 2017. – Vol. 1. – P. 1050–1055.
4. Marti, U.-V. The IAM-database: An English sentence database for offline handwriting recognition / U.-V. Marti, H. Bunke // International Journal on Document Analysis and Recognition. – 2002. – Vol. 5, No. 1. – P. 39–46.
5. Bluche, T. Gated convolutional recurrent neural networks for multilingual handwriting recognition / T. Bluche, R. Messina // 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). – 2017. – Vol. 1. – P. 646–651.
6. Puigcerver, J. Are multidimensional recurrent layers really necessary for handwritten text recognition? / J. Puigcerver // 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR). – 2017. – Vol. 1. – P. 67–72.
7. Wang, Z.-R. Writer-aware CNN for parsimonious HMM-based offline handwritten Chinese text recognition / Z.-R. Wang, J. Du, J.-M. Wang // Pattern Recognition. – 2020. – Vol. 100. – No. 107102. – P. 1–32.
8. Ahmadzadeh, E. A Deep Bidirectional LSTM-GRU Network Model for Automated Ciphertext Classification / E. Ahmadzadeh, H. Kim, O. Jeong, N. Kim, I. Moon // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 3228–3237.
9. Чичкарев, Е. Использование моделей машинного обучения и сетей глубокого обучения для распознавания рукописных чисел и букв русского и латинского алфавитов / Е. Чичкарев, А. Сергиенко, Е. Балалаева // Scientific Collection «InterConf». Concepts for the development of society's scientific potential (InterConf). – 2021. – Vol. 87. – P. 363–380.
10. Nurseitov, D. Handwritten Kazakh and Russian (HKR) database for text recognition / D. Nurseitov, K. Bostanbekov, D. Kurmankhojayeov, A. Alimova, A. Abdallah // Multimedia Tools and Applications. – 2021. – Vol. 80. – P. 33075–33097.

11. Graves, A. Connectionist temporal classification: Labelling unsegmented sequence data with recurrent neural networks / A. Graves, S. Fernández, F. Gomez, J. Schmidhuber // Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning. – 2006. – P. 369–376.

12. Cho, K. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation / K. Cho et al. – arXiv:1406.1078, 2014.

13. Cyrillic Handwriting Dataset [Электронный ресурс] // Kaggle.com: Your Machine Learning and Data Science Community. – URL: <https://www.kaggle.com/datasets/constantinwerner/cyrillic-handwriting-dataset> (дата обращения: 01.08.2022).

14. Frinken, V. Continuous handwritten script recognition / V. Frinken, H. Bunke // Handbook of Document Image Processing and Recognition. – 2014. – P. 391–425.

15. Simple and Efficient Transformer HTR [Электронный ресурс] // Kaggle.com: Your Machine Learning and Data Science Community. – URL: <https://www.kaggle.com/code/constantinwerner/simple-and-efficient-transformer-htr/notebook> (дата обращения: 01.08.2022).

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ СФЕРЫ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ВОКСЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.А. Сычева, А.В. Толоч

Разработка информационных систем высокоточного компьютерного моделирования является актуальной задачей в условиях всевозрастающих требований к полноте и точности представления информации. Аналитическое моделирование обеспечивает наиболее точное представление геометрической информации, востребованной в задачах проектирования и моделирования. R-функциональное моделирование предоставляет широкие возможности по аналитическому моделированию сложных предикатных функций посредством теоретико-множественных операций над алгебраическими функциями. В статье ставится задача нахождения способа представления полигональных моделей в виде, подходящем для из применения в R-функциональном моделировании. Метод функционально-воксельного моделирования предлагается как метод, позволяющий упростить и ускорить производимые вычисления, создавая компьютерные представления функций, применимые в R-функциональном моделировании. Функция локального обнуления (ФЛОБ) рассмотрена как перспективный и универсальный инструмент функционально-воксельного моделирования. Особое внимание уделено ее многомерности – конкретно рассмотрены двумерный и трехмерный случай. В качестве примера трехмерного случая представлено ФЛОБ-конструирование на примере функции сферы. Сделаны выводы о точности полученного представления и возможностях применения трехмерной функции локального обнуления в проектировании.

Ключевые слова: локальная компьютерная геометрия, функционально-воксельное моделирование, R-воксельное моделирование, ФЛОБ.

Введение. Компьютерное геометрическое моделирование является важным составляющим компьютерных наук, так как предоставляет компьютеру геометрическую информацию для решения различных задач управления и проектирования.

Аналитическое моделирование является наиболее точным средством представления геометрической информации для моделирования на компьютере. Среди прочих стоит выделить теоретико-множественное R-функциональное моделирование (RFM) [1-4]. Для RFM алгебраическая

функция представляется своей внутренней и внешней областью. Построение модели сложной функции осуществляется посредством применения полной системы R-функций (1), включающей в себя выражения для нахождения объединения и пересечения двух предикатно представленных функций w_1 и w_2 .

$$\begin{cases} w_1 \wedge_{\alpha} w_2 = \frac{1}{1+\alpha} (w_1 + w_2 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2 - 2\alpha w_1 w_2}) \\ w_1 \vee_{\alpha} w_2 = \frac{1}{1+\alpha} (w_1 + w_2 + \sqrt{w_1^2 + w_2^2 - 2\alpha w_1 w_2}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\overline{w_1} \equiv -w_1$$

Однако R-функциональные вычисления являются вычислительно затратными в силу специфики рекурсивного усложнения расчетной схемы при многоуровневом моделировании предикатной функции. Также нельзя забывать, что R-функциональное моделирование подходит только для алгебраически представленных функций, что значительно сужает его возможности в задачах проектирования.

Метод функционально-воксельного моделирования [5], хорошо зарекомендовавший себя в решении ряда задач [6-8], позволяет быстро и точно создать компьютерное представление пространства локальных функций путем линейной аппроксимации поверхности алгебраической функции любой сложности. Например, следующая алгебраическая функция (2) посредством локальных геометрических характеристик n_1, n_2, n_3, n_4 представляется линейной локальной функцией (3) для каждой точки рассматриваемой области. При этом локальные геометрические характеристики хранятся в графических M-образах (рис. 1) и всегда доступны для дальнейших вычислений.

$$z = -y + \frac{\sin \pi x}{\sqrt{|y|+10}} - y \cos x^2 (y + x^2 + 16xy + y^2) \quad (2)$$

$$z = -\frac{n_1}{n_3} x - \frac{n_2}{n_3} y + \frac{n_4}{n_3} \quad (3)$$

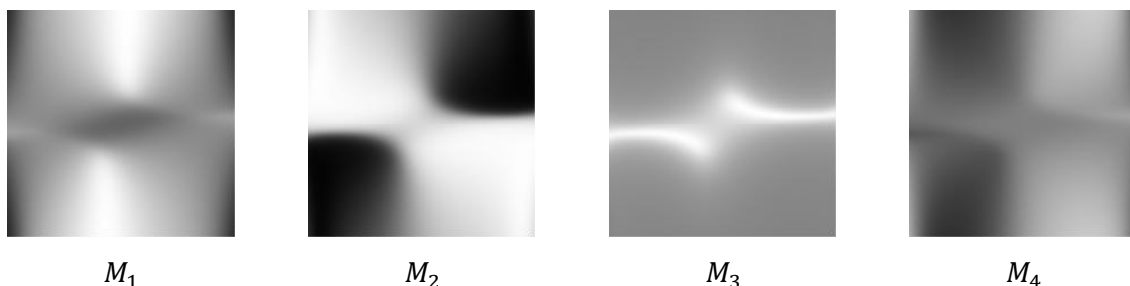


Рис. 1. Графические M-образы сложной функции

Более того, метод функционально-воксельного моделирования предоставляет свою арифметику для проведения R-функциональных расчетов, благодаря которой отсутствует необходимость переаппроксимации каждого этапа расчетов. С применением динамического

подхода к структурной реализации рекурсивного расчета с предварительным сохранением ФВ-представления каждой последней расчетной процедуры, позволяет значительно ускорить работу над компьютерным вычислением в целом.

Функция локального обнуления (ФЛОБ). В настоящее время постоянно расширяются возможности и инструменты функционально-воксельного метода. Одним из таких инструментов функционально-воксельного моделирования является функция локального обнуления.

Функция локального обнуления [9] – нулевой n -мерный элемент в положительном $n+1$ -мерном пространстве, задаваемый алгебраическим выражением. Так, в двумерном случае ФЛОБ представляет собой нулевой одномерный отрезок, ограниченный точками $(X_1; Y_1)$ и $(X_2; Y_2)$ на положительной плоской области функции, выраженный функцией (4).

$$z = \sqrt{(Y - Y_2)^2 + (X - Y_2)^2} + \sqrt{(Y_1 - Y)^2 + (X_1 - X)^2} - \sqrt{(Y_1 - Y_2)^2 + (X_1 - X_2)^2} \quad (4)$$

По сути это выражение описывает сравнение суммы длин отрезков $l_1 + l_2$, образуемых общей точкой (X, Y) и двумя узловыми точками $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$ с расстоянием l между этими узловыми точками (рис. 2).

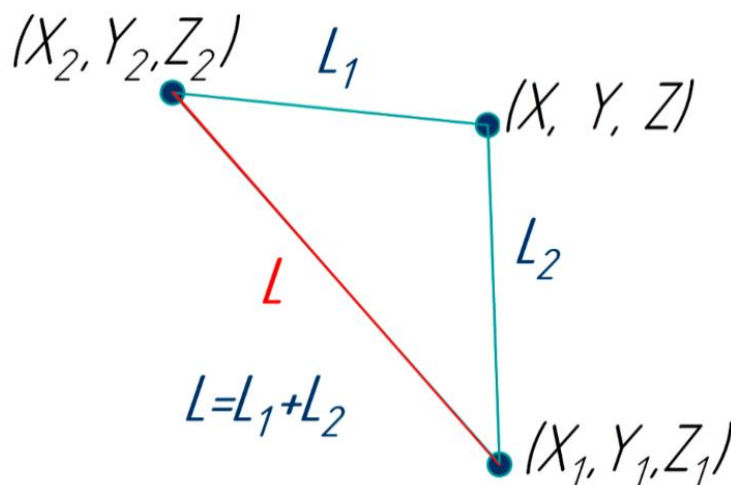


Рис. 2. Схема расчета двумерного ФЛОБа

Последовательное пересечение нескольких ФЛОБов, соединенных друг за другом, позволяет осуществить построение плоского нулевого контура на положительной плоскости пространства любой сложности. Таким образом возможно построение как ранее исследуемых кривых Безье [10], так и построение любых параметрических кривых или разбиваемых на отрезки контуров [11]. Примеры таких моделей представлены на рис. 3.

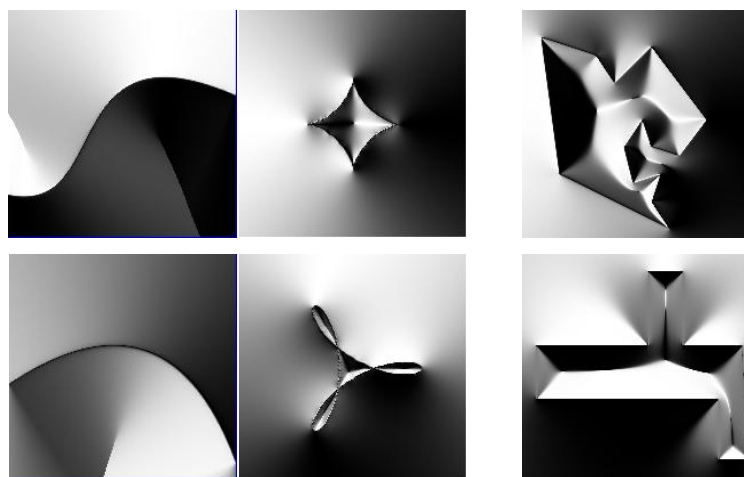


Рис. 3. Примеры ФЛОБ-конструированных моделей

Двухмерная функция локального обнуления (треугольник) по тому же принципу, только на сравнении площадей, позволяет создавать нулевые триангулированные границы геометрического объекта как трехмерной функции, задаваемой гладкой пластичной поверхностью. При этом корректность построения ФЛОБа не зависит от положения и направления обхода вершин, а точность представления компьютерной модели достигается уменьшением шага дискретизации и повышением разрешения воксельных графических образов. Все вышесказанное делает ФЛОБ универсальным конструкторским инструментом функционально-воксельного моделирования.

Отдельно стоит подчеркнуть n-мерность ФЛОБа. Одномерный ФЛОБ задается по сути сравнением длин отрезков. Аналогично возможно сформулировать и двухмерный ФЛОБ, только в таком случае речь будет идти о сравнении площадей треугольников и т.д. (рис. 4).

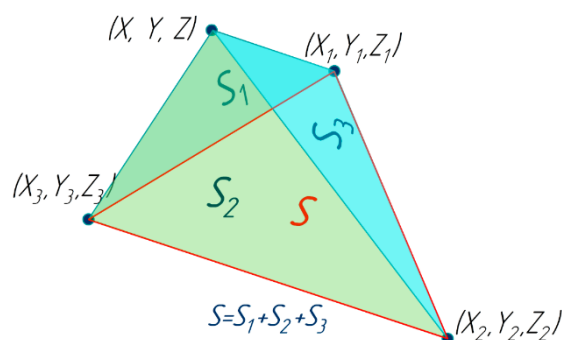


Рис. 4. Схема расчета трехмерного ФЛОБа

Тогда функция, задающая нулевой плоский треугольник в трехмерном положительном пространстве, будет иметь вид:

$$z = S_1 + S_2 + S_3 - S \quad (5)$$

где S – площадь двумерного ФЛОБа, S_1, S_2, S_3 – площади треугольников, образованных текущей точкой (X, Y, Z) и перебором вершин трехмерного ФЛОБа.

Одномерный ФЛОБ позволяет построить функционально-воксельную модель любого плоского контура, разбиваемого на отрезки. Двухмерный ФЛОБ в свою очередь позволит осуществить построение функционально-воксельной модели любой поверхности, разбиваемой на треугольники.

ФЛОБ-конструирование сферы. Анализировать применение ФЛОБа для трехмерного функционально-воксельного моделирования целесообразно на примере хорошо известной и геометрически предсказуемой функции сферы, взятой по модулю:

$$\omega = |1 - x^2 - y^2 - z^2| \quad (6)$$

Наглядным в данном случае представлением функционально-воксельной модели алгебраической функции единичной сферы (6) являются 2 М-образа ее проекции на плоскость ХОУ (рис. 5).

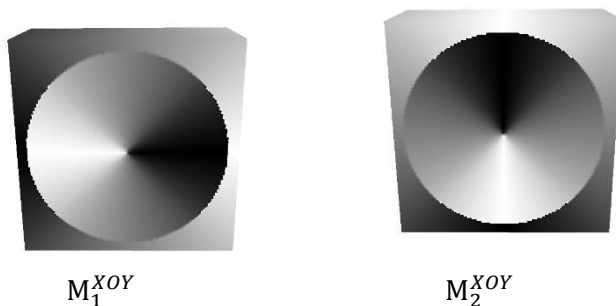


Рис. 5. М-образы проекции функции сфера на плоскость ХОУ

Для моделирования данной сферы посредством двумерного ФЛОБа необходимо ее разбиение на треугольники. Каждый из этих треугольников будет моделироваться двухмерным ФЛОБом. Их последовательное R-функциональное пересечение позволит промоделировать поверхность всей сферы. С увеличением количества треугольников повышается точность представления модели, но при этом возрастают требуемые вычислительные и временные ресурсы.

Наглядное изображение разбиения сферы на 80 треугольников представлено на рис. 6.

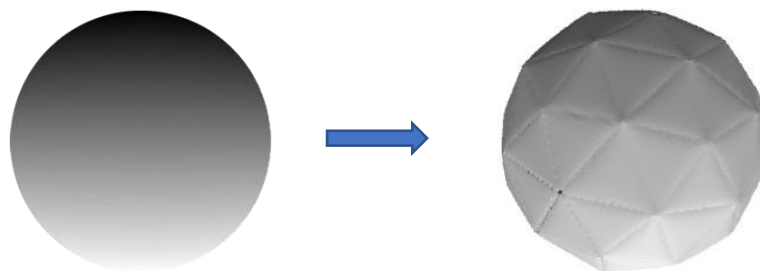


Рис. 6. Разбиение сферы на 80 треугольников

Функционально-воксельная модель триангулированной сферы, полученная ФЛОБ-конструированием, представлена в порожденных М-образях отношения компонентов нормали на рисунке 7. На изображении наблюдается в целом совпадение поведения функции с высокой точностью. Это говорит о правомерности применения ФЛОБа в дискретном моделировании пространства функции.

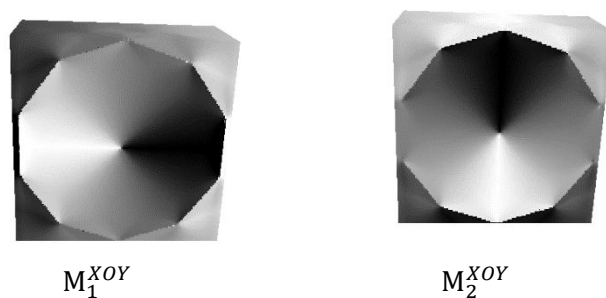


Рис. 7. М-образы проекции на плоскость XOY флОб-конструированной функции сферы

При рассмотрении других М-образов полученной модели также наблюдается высокая точность совпадения локальных геометрических характеристик, зависящая от разрешения дискретной модели (количества и величины применяемых треугольников). Так, незначительные различия в произведенных расчетах возможно наблюдать при сравнении М-образов проекций полученных моделей на плоскость ZOX (рис. 8).

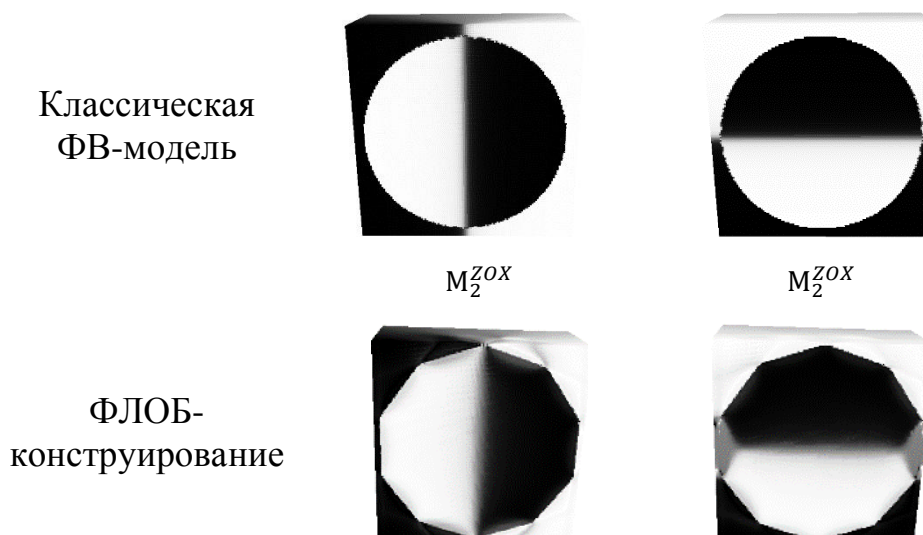


Рис. 8. Сравнение точности вычисления локальных геометрических характеристик

Повысить точность проводимых вычислений возможно и посредством увеличения количества рекурсивных этапов вычислений, постепенно

уточняющих модель последовательным разбиением зоны локальных характеристик. Так, все ранее представленные в данной статье модели были реализованы посредством 7 итераций разбиения. Рассмотрим модели, реализованные посредством 8 итераций, на примере образов проекции на плоскость ZOX , так как именно эти образы в данном случае являются наиболее наглядными.

На представленных изображениях заметно повышение точности классической ФВ-модели алгебраической функции сферы. С другой стороны, для ФЛОБ-конструированной модели подобного повышения точности не наблюдается. Это вызвано тем, что при разбиении сферы на данное количество треугольников, полученная точность является максимальной. Для повышения точности модели посредством увеличения количества рекурсивных шагов разбиения, сначала необходимо увеличить количество треугольников, аппроксимирующих поверхность сферы.

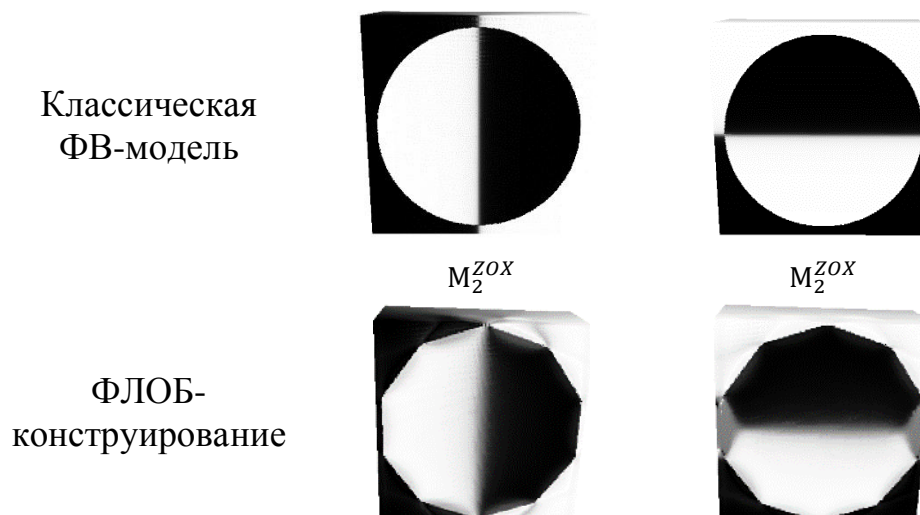


Рис. 9. Сравнение точности вычисления локальных геометрических характеристик

Заключение. Функция локального обнуления является перспективным инструментом функционально-воксельного моделирования, причем не только для плоского случая, но и многомерного. В области трехмерного функционально-воксельного моделирования ФЛОБ открывает возможность применения аппроксимационных поверхностей компьютерных моделей, описываемых набором смежных полигонов, в отличие от классического подхода, требующего зачастую сложного алгебраического выражения поверхности.

ФЛОБ позволяет создавать функционально-воксельные модели, причем точность результатов моделирования зависит от нескольких задаваемых параметров: цветовая палитра и размер графического образа, количество треугольников, шаг дискретизации и т.п. Это позволяет гибко

расставлять приоритеты между скоростью и точность вычислений. Более того правильность построения ФЛОБа не зависит от его положения и направления обхода вершин контура, что позволяет использовать разработанные алгоритмы для построения самых различных конфигураций.

Дальнейшее применение и развитие ФЛОБ-конструирования значительно расширит возможности R-функционального и функционально-воксельного моделирования сложных объектов, что позволит создавать наиболее точные модели.

Библиографический список

1. Рвачев, В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения [Текст] / В.Л. Рвачев – Киев: Наукова думка, 1982. – 552 с.

2. Максименко-Шейко, К. В. Метод R-функций в математическом моделировании теплообмена при движении жидкости по цилиндрическим каналам с центральными винтовыми вставками / К.В. Максименко-Шейко // Проблемы машиностроения. – 2010. – Т. 13. – № 4. – С. 58–67.

3. Лисин, Д.А. Математическое моделирование поверхностей автомобилей с помощью R-функций / Д.А. Лисин, К.В. Максименко-Шейко, Т.И. Шейко // Проблемы машиностроения. – 2013. – Т. 16. – № 3. – С. 51–60.

4. Литвинова, Ю.С. Математическое и компьютерное моделирование строительных конструкций на основе R-функций / Ю.С. Литвинова, К.В. Максименко-Шейко, Т. И. Шейко // Проблемы машиностроения. – 2014. – Т. 17. – № 3. – С. 45–52.

5. Толлок, А. В. Локальная компьютерная геометрия: учебное пособие / А.В. Толлок — Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2022. — 147 с. — ISBN 978-5-4497-1630-9. — Текст: электронный // IPR SMART: [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/120286.html> (дата обращения: 31.06.2022). — Режим доступа: для авторизир. пользователей. - DOI: <https://doi.org/10.23682/120286>

6. Лоторевич, Е.А. Геометрические преобразования пространства функционально-воксельной модели: специальность 05.01.01 "Инженерная геометрия и компьютерная графика»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лоторевич Евгений Андреевич. – Нижний Новгород, 2016. – 22 с.

7. Плаксин, А.М. Геометрическое моделирование тепловых характеристик объектов функционально-воксельным методом / А.М. Плаксин, С.А. Пушкарёв // Геометрия и графика. – 2020. – Т. 8. – № 1. – С. 25–32.

8. Локтев, М.А. Особенности применения функционально-воксельного моделирования в задачах поиска пути с препятствиями / М.А. Локтев // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2016. – № 1(161). – С. 45–49.

9. Tolok, A. V. Local R-Functional Modelling (LRFM) / A.V. Tolok, N.B. Tolok // Proceedings of the 31st International Conference on Computer Graphics and Vision. – 2021. – No. 3027. –P. 618–628

10. Tolok, A. Geometric aspects of the functional-voxel implementation of the ORCA algorithm / A. Tolok, A. Sycheva // CEUR Workshop Proceedings: 31, Nizhny Novgorod, 27–30 сентября 2021 года. – Nizhny Novgorod, 2021. – P. 637–644.

11. Шутова, К. Ю. Моделирование опасных зон и препятствий на основе метода «избегания хищника» при стайном движении автономных агентов / К. Ю. Шутова // Управление большими системами: труды XVII Всероссийской школы-конференции молодых ученых, Москва-Звенигород, 06–09 сентября 2021 года. – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 375–386.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЙРОСЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ СМЕШАННОГО ЛИНЕЙНОГО ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Д.Л. Ханкин, С.В. Феофилов, А.В. Козырь

Использование нейросетевого регулятора в качестве системы управления сложным нелинейным динамическим объектом является одним из основных направлений развития современной теории управления. В статье разрабатывается подход, основанный на синтезе нейросетевой функции Ляпунова совместно с регулятором, что позволит гарантировать устойчивость замкнутой системы управления. Показано, что поиск нейросетевой функции Ляпунова может быть представлен в виде решения задачи смешанного целочисленного линейного программирования, для которой разработаны эффективные решатели.

Ключевые слова: нейроуправление, нейросетевая функция Ляпунова, смешанное целочисленное программирование, устойчивость, синтез стабилизирующего регулятора.

В последнее время широкую популярность приобрело применение нейронных сетей для решения обширного круга задач робототехники и мехатроники. Успехи в области машинного обучения и прикладных аппаратных вычислительных систем позволяют практическое использование нейросетевых регуляторов в системах управления динамическими системами, таким как промышленные манипуляторы [1], робототехника, беспилотные летательные аппараты [2], силовая электроника и т.д. Несмотря на демонстрацию высокой производительности таких регуляторов, даже самые простые контроллеры, имеющие неразветвленную нейросетевую архитектуру, не имеют никаких теоретических обоснований устойчивости системы управления, что ставит под угрозу их применение в промышленности. Основное объяснение этому кроется в их репутации «черного ящика», поведение которых невозможно предсказать. Существующие подходы к оценке обученных моделей часто основаны на тестировании с использованием наборов данных [3]. В работе [4] впервые предложен метод тестирования простых нейронных сетей с одним скрытым слоем. Однако тестирование позволяет выявлять наличие некоторых ошибок, а не гарантирует их полное отсутствие.

Если нейросетевые регуляторы будут использоваться в таких приложениях, как управление автономными летательными аппаратами,

необходимо иметь возможность проверять критически важное для безопасности поведение замкнутой системы.

Важнейшей критерием, которого в настоящее время не хватает нейросетевым контроллерам, является устойчивость замкнутой системы по Ляпунову. Система является устойчивой, если, начиная с любого состояния внутри некоторой области, система в конечном итоге приходит к равновесию. Устойчивость по Ляпунову может дать гарантию асимптотического поведения системы для любого состояния внутри области притяжения. Хорошо известно, что по Ляпунову система устойчива тогда и только тогда, когда существует функция Ляпунова, которая строго положительна и строго убывающая везде, кроме случая равновесного состояния. Существуют различные подходы к численному построению функций Ляпунова для нелинейных систем с нейросетевым управлением [4], [7]. Многие существующие подходы основаны на полиномиальной аппроксимации динамики и поиске суммы квадратов полиномов в качестве функций Ляпунова с помощью полуопределенного программирования (SDP) [4]. На практике полиномиальные приближения накладывают значительные ограничения на системы и структуру функций Ляпунова, а также возникает проблема чувствительности алгоритма SDP [7].

В настоящей работе предлагается подход к исследованию устойчивости систем управления с нейросетевым регулятором, в котором задача поиска функции Ляпунова для замкнутой системы сводится к обучению дополнительной нейронной сети на данных, полученных в результате решения задачи смешанного целочисленного линейного программирования (СЦП).

В качестве нейронных сетей используются сети прямого распространения с функциями активации типа leakyReLU [5]. Данная функция активации может быть представлена системой ограничений. Это позволяет представить всю нейронную сеть как систему неравенств, которую в последующем можно будет решать с помощью СЦП. СЦП позволяет искать такие состояния, которые нарушают условия существования функции Ляпунова, или подтвердить их выполнение в заданной области.

Работа организована следующим образом: вначале будет показано как нейронную сеть с функцией активации leakyReLU можно представить в виде системы неравенств для решения задачи целочисленного программирования, т.е. находить решение удовлетворяющие целевой функции и заданным ограничениям; далее разрабатывается структура нейросетевого регулятора устойчивого по Ляпунову; в завершении представлен простейший пример стабилизации неустойчивого объекта управления с помощью нейросетевого регулятора.

Докажем, что выход представленной на рисунке 1 простейшей нейронной сети [8] прямого распространения при любом входном значении больше -5 . Для доказательства можно найти минимальное значение выхода нейронной сети при ограничении на входные параметры. Т. е. решить задачу оптимизации с учетом заданных ограничений. Частным случаем таких задач являются задачи целочисленного программирования. Для приведения к такой задаче необходимо привести данную нейронную сеть к системе неравенств.

Данная нейронная сеть (рис. 1) имеет функцию активации leakyReLU (рис. 2), которую можно представить в виде следующей системы неравенств (1):

$$\begin{aligned}
 y &= F(x); y \in \mathbb{R}; \\
 y &\geq x; y \geq \delta x; \\
 y &\leq \delta x + (1 - \delta)x_{\max} b; \\
 y &\leq \delta x + (1 - \delta)x_{\min}(b - 1); \\
 b &\in [0, 1];
 \end{aligned} \tag{1}$$

где b – бинарная переменная отображающая какая часть функции активации leakyReLU активна ($b=0$ – для отрицательной, $b=1$ – для положительной).

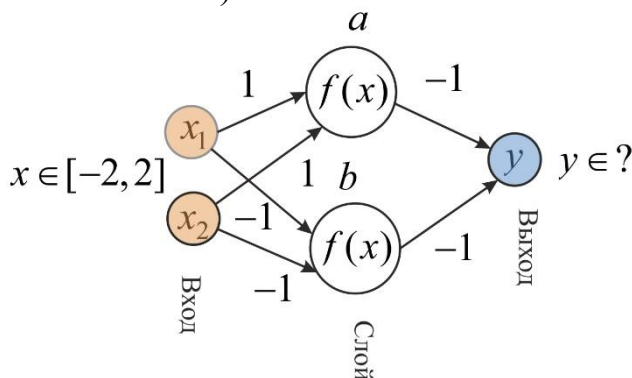


Рис. 1. Преобразования НС в СЦП задачу

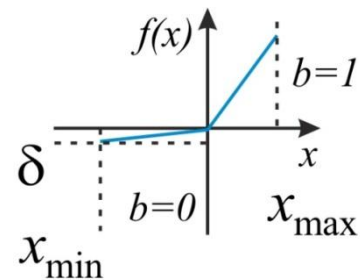


Рис. 2. Функция активации leakyReLU

Представим НС из рисунка 1 в виде системы неравенств:

$$\begin{aligned}
 -2 &\leq x_1 \leq 2; \\
 -2 &\leq x_2 \leq 2;
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 a_i &= x_1 + x_2; \\
 b_i &= -x_1 - x_2;
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$a \geq a_i; \quad a \geq 0; \quad b \geq b_i; \quad b \geq 0;$$

$$a \leq a_i^{ub} \beta_a, \beta_a \in [0, 1]; \quad b \leq b_i^{ub} \beta_b, \beta_b \in [0, 1]; \tag{4}$$

$$a \leq a_i + a_i^{lb} (\beta_a - 1); \quad b \leq b_i + b_i^{lb} (\beta_b - 1);$$

$$y = -a - b.$$

Найдем минимальное возможное значение y с помощью решателя СЦП. В качестве решателей использовались CBC, SCIP и GUROBI [10], которые выдали одинаковый результат $y = -4$ при $x_1 = -2, x_2 = -2$. Если рассмотреть все решения, которые могут получиться (рис. 3), то окажется, что минимально возможное значение y будет возможно при $x_1 = 2, x_2 = 2$ или при $x_1 = -2, x_2 = -2$.

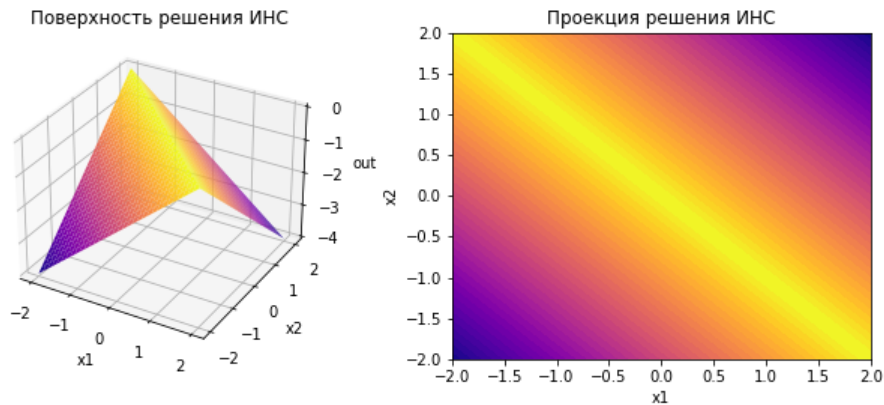


Рис. 3. Поверхность решения НС

Таким образом, преобразуя НС к системе неравенств можно решать задачи целочисленного линейного программирования для поиска значений, удовлетворяющим целевой функции. Похожим образом можно составить задачу определения функции Ляпунова для замкнутой системы управления. Будем рассматривать синтез стабилизирующего нейросетевого регулятора с соответствующей НС функцией Ляпунова. Структурная замкнутой системы управления приведена на рис. 4.

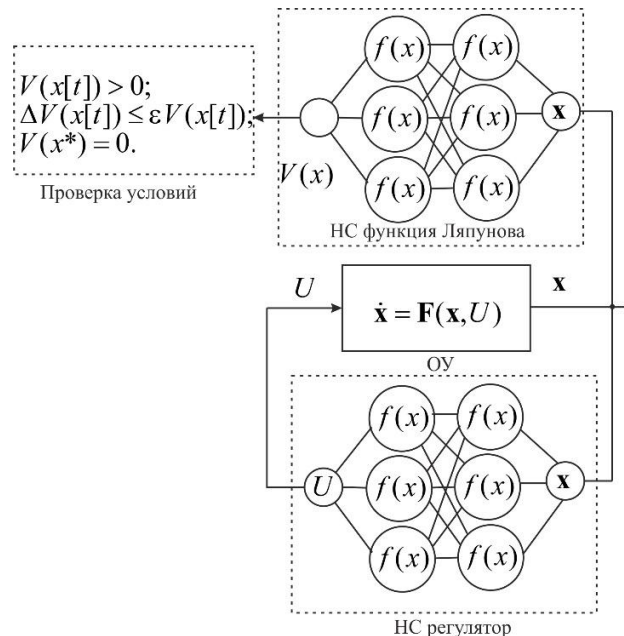


Рис. 4. Замкнутая система управления

Для доказуемой устойчивости замкнутой системы по Ляпунову можно синтезировать нейросетевую функцию Ляпунова для этого должны выполняться следующие условия:

$$\mathbf{V}(\mathbf{x}[t]) > 0 \quad \forall \mathbf{x}[t] \in \mathbf{S}, \mathbf{x}[t] \neq \mathbf{x}^*; \quad (5)$$

$$\mathbf{V}(\mathbf{x}[t+1]) - \mathbf{V}(\mathbf{x}[t]) \leq \varepsilon \mathbf{V}(\mathbf{x}[t]), \quad \forall \mathbf{x}[t] \in \mathbf{S}; \quad (6)$$

$$\mathbf{V}(\mathbf{x}^*) = 0; \quad (7)$$

$\mathbf{x}[t]$ – вектор состояния системы в момент времени t ; \mathbf{S} – область устойчивости системы, $\varepsilon \in [0,1]$. Нейросетевая функция Ляпунова будет обучаться исходя из состязательной стратегии, при которой будут искаться состояния нарушающие условия (5)-(7). Таким образом необходимо решить задачу оптимизации следующих целевых функций

$$\max_{\mathbf{x}[t] \in \mathbf{S}} \varepsilon \left| R(\mathbf{x}[t] - \mathbf{x}^*) \right|_1 - V(\mathbf{x}[t]); \quad (8)$$

$$\max_{\mathbf{x}[t] \in \mathbf{S}} V(\mathbf{x}[t+1]) + (\varepsilon - 1)V(\mathbf{x}[t]).$$

После получения значений состояния, которые максимально нарушают условия существования функции Ляпунова, нужно на их основе произвести обучение нейронных сетей. Для этого на полученных значениях нейронные сети учатся минимизировать ошибки условий существования функции Ляпунова. Т.е. нейронная сеть должна минимизировать следующую функцию:

$$\eta_1 = \max_{\mathbf{x} \in \mathbf{S}} (\varepsilon \left| R(\mathbf{x}[t] - \mathbf{x}^*) \right|_1 - V(\mathbf{x}[t]));$$

$$\eta_2 = \max_{\mathbf{x} \in \mathbf{S}} (V(\mathbf{x}[t+1]) + (\varepsilon - 1)V(\mathbf{x}[t]));$$

$$G(\mathbf{x}[t], \mathbf{x}[t+1]) = |\eta_1| + |\eta_2| \rightarrow \min.$$

Таким образом, минимизируя $G(\mathbf{x}[t], \mathbf{x}[t+1])$ обучается функция Ляпунова и нейроконтроллер. В результате можно получить область устойчивости \mathbf{S} .

Рассмотрим пример синтеза нейросетевого стабилизирующего регулятора для упрощенной модели перевернутого маятника. Динамика системы может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= \frac{u - mgl \cdot \sin(x_1) - dx_2}{ml^2}; \end{aligned} \quad (9)$$

где m – масса маятника, l – длина маятника, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, d – коэффициент демпфирования, x_1 – угловое положение маятника, x_2 – угловая скорость маятника, u – управляющее воздействие.

Задача сделать регулятор, который удерживал бы маятник в вертикальном положении и для подтверждения устойчивости построить нейросетевую функцию Ляпунова. Структурная схема системы управления

представлена на рис. 4. Для системы, с помощью подхода обратного распространения ошибки был получен нейросетевой имитатор объекта управления (ОУ) и стабилизирующий регулятор. С помощью СЦП была получена нейросетевая функция Ляпунова поверхность функции показана на рис. 5, и область устойчивости замкнутой системы рис. 6.

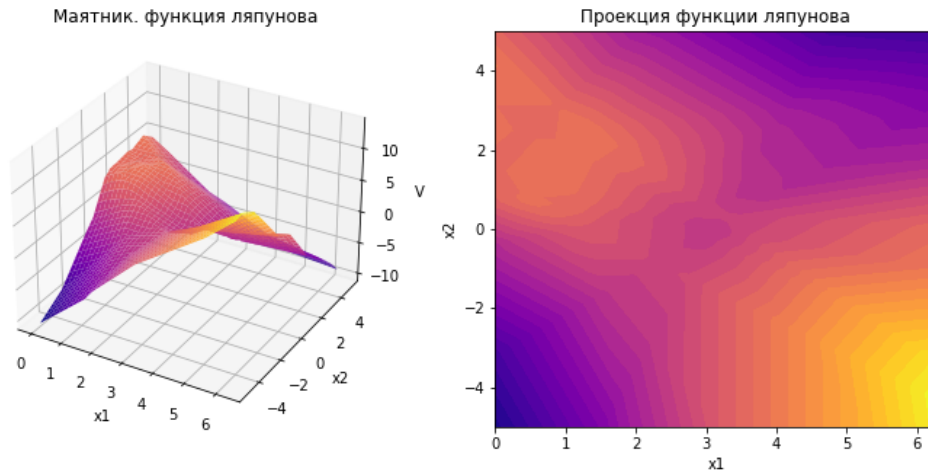


Рис. 5. Поверхность нейросетевой функция Ляпунова

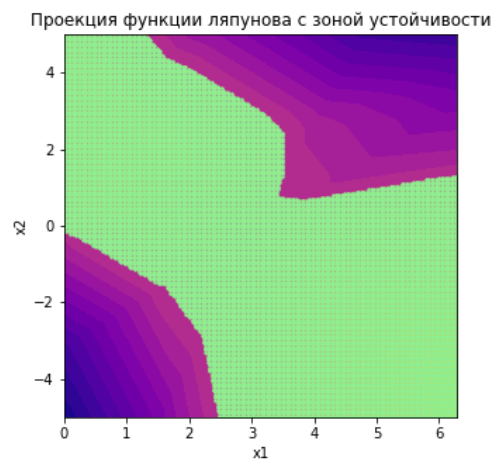


Рис. 6. Область устойчивости

Заключение. В работе было показано, что решение задач оптимизации с нейронной сетью можно свести к задаче СЦП. Далее этот подход распространяется на построение нейросетевой функции Ляпунова для замкнутой системы управления с нейросетевым регулятором, что позволяет гарантировать устойчивость системы. На примере стабилизации неустойчивого динамического объекта типа перевернутого маятника синтезирован регулятор совместно с функцией Ляпунова.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках государственного задания по теме «Развитие теории прикладных интеллектуальных систем вооружения и военной техники (FWG-2022-0003)».

Библиографический список

1. Bastani, O. Measuring Neural Net Robustness with Constraints / O. Bastani, et al. arXiv:1605.07262 [cs]. [Электронный ресурс]. – URL: <https://arxiv.org/abs/1605.07262> свободный (дата обращения: 20.09.2022).
2. Bonna, R. Trajectory Tracking Control of a Quadrotor Using Feedback Linearization / R. Bonna, J. Camino // Proceedings of the XVII International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics DINAME 2015. – Brazil, RN, 2015.
3. Agrawal, A. Differentiable Convex Optimization Layers / A. Agrawal, et al. // 33rd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2019). – Vancouver, Canada, 2019.
4. Cheng, C. Verification of Binarized Neural Networks via Inter-neuron Factoring / C. Cheng, et al. // Verified Software. Theories, Tools, and Experiments: Lecture Notes in Computer Science / eds. R. Piskac, P. Rümmer. – Cham: Springer International Publishing, 2018. – P. 279–290.
5. Феофилов, С.В. Анализ методов обучения искусственной нейронной сети / С.В. Феофилов, Д.Л. Хапкин // Информатика: проблемы, методы, технологии. Материалы XXI Международной научно-методической конференции. Воронеж, 2021. – С. 1314–1322.
6. Katz, G. Reluplex: An Efficient SMT Solver for Verifying Deep Neural Networks / G. Katz, et al. // Computer Aided Verification: Lecture Notes in Computer Science / eds. R. Majumdar, V. Kunčak. – Cham: Springer International Publishing, 2017. – Reluplex. – P. 97–117.
7. Parrilo, P.A. Structured Semidefinite Programs and Semialgebraic Geometry Methods in Robustness and Optimization / P.A. Parrilo. – California Institute of Technology, 2000. – 234 p.
8. Feofilov, S.V. Synthesis of neural network controllers for objects with non-linearity of the constraint type / S.V. Feofilov, D.L. Khapkin // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1958, Iss. 1. – P. 012014.
9. Anderson, R. Strong mixed-integer programming formulations for trained neural networks / R. Anderson, et al. // Mathematical Programming. – 2020. – Vol. 183, No. 1. – P. 3–39.
10. Vigerske, S. SCIP: global optimization of mixed-integer nonlinear programs in a branch-and-cut framework / S. Vigerske, A.M. Gleixner // Optimization Methods and Software. – 2018. – Vol. 33. – P. 563–593.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ПЛАСТИЧНЫМИ СИНАПТИЧЕСКИМИ ЗАДЕРЖКАМИ

Н.В. Чаплинская

Пластичность временных задержек на синапсах – биологический эффект, влияющий на память и обучаемость нейронов. В данной работе представлены результаты моделирования импульсной нейронной сети, обученной распознавать контрастные образы путем изменения исключительно задержек на синапсах. Приведены результаты тестирования работы сети на изображениях сниженной контрастности.

Ключевые слова: импульсные нейронные сети, распознавание образов, синаптические задержки, кодирование временем первого спайка.

Импульсные нейронные сети (ИмНС) принято считать третьим поколением искусственных нейронных сетей. Импульсная нейронная сеть отличается от традиционной, главным образом, способом распространения информации по сети. В то время как традиционная искусственная нейронная сеть работает с целочисленными или вещественными входами и выходами, импульсная нейронная сеть оперирует данными, представленными в виде серии импульсов – спайков. Работа нейрона и, в частности, возникновение спайка определяется при помощи дифференциальных уравнений, соответствующих функционированию этого нейрона в сети. Таким образом импульсная нейронная сеть пытается наиболее близко воспроизвести поведение реальной биологической нейронной сети с целью изучения основных принципов работы нашего мозга и использовании всех его преимуществ.

Импульсные нейронные сети в наши дни успешно решают задачи распознавания и обнаружения [1], задачи тактильного восприятия [2] и обработки нейромедицинских данных [3], применяются во многих областях, включая робототехнику [4], компьютерное зрение [5], протезирование [6]. Ко всему прочему, успешная работа нейроморфных чипов (Loihi, Tianjic) и нейроморфных систем (BrainScaleS, Neurogrid) свидетельствует о большом потенциале аппаратной реализации импульсных нейронных сетей.

Тем не менее, в погоне за успехами стандартных искусственных нейронных сетей, многие исследования последних лет пренебрегают возможностями реализации импульсной нейронной сети на более высоком уровне правдоподобности, делая выбор в пользу больших многослойных ИмНС с простейшей структурой нейронов. Получаемый «черный ящик»

зачастую лишь отдаляет нас от понимания локальных процессов, которые ежесекундно происходят в мозге и которые, возможно, также должны происходить в соответствующих искусственных нейронных сетях, чтобы в перспективе последние смогли внести свой вклад в искусственный интеллект будущего.

Пластичность весов синапсов и задержек импульсов на синапсах – явление, сопровождающее процесс обучения биологической нейронной сети. Однако если обучение изменением весов синапсов уже несколько лет используется многими научными коллективами, то эффект пластичности задержки импульсов на синапсе применительно к обучению исследуется только в двух современных работах: в одной импульсная нейронная сеть обучается как пластичностью весов, так и пластичностью задержек [7], во второй обучение основывается исключительно на изменении синаптических задержек [8]. Тем не менее, в деталях проследить функционирование каждого нейрона в обеих работах не удастся ввиду использования авторами больших ИмНС.

В данной работе рассматривается новое правило обучения, основанное на эффекте пластичности синаптических задержек. Корректность работы правила продемонстрируем на задаче распознавания четырех контрастных образов. Пусть образы представляют собой световые линейки из десяти пикселей, на каждой из которых световое пятно смещено в определенном направлении: по краям, по центру, по правой стороне и по левой стороне (рис. 1).

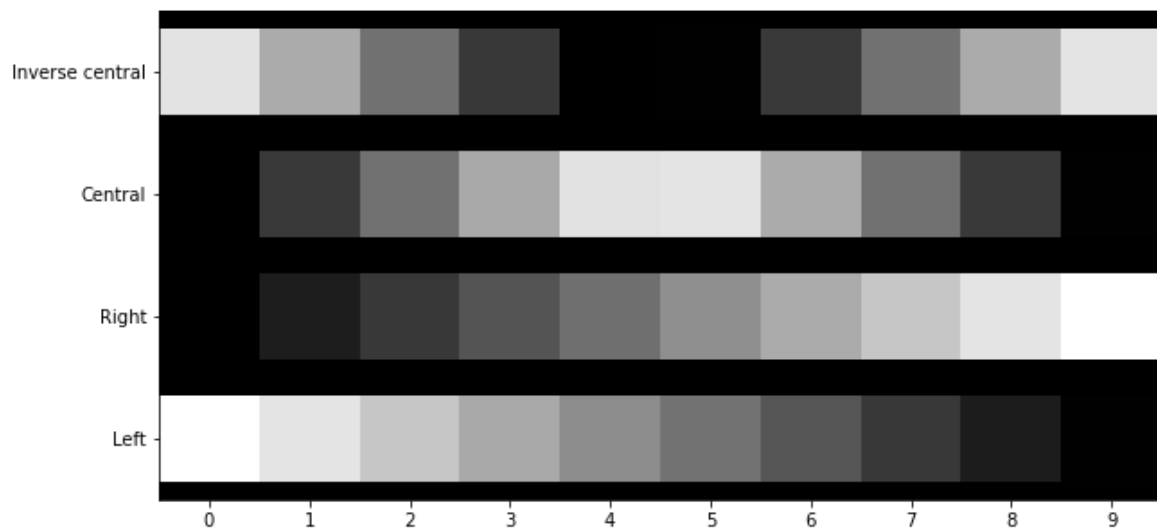


Рис. 1. Четыре используемых эталонных изображения из 10 пикселей

Образы предлагается кодировать временем первого спайка (TTFS): входной нейрон от самого яркого пикселя выдаст спайк первым, а входной нейрон от самого темного пикселя выдаст спайк последним на текущей экспозиции изображения (рис. 2). Изображение экспонируется несколько

раз, в каждый из которых выходные нейроны, подстраивая задержки на синапсах от входных нейронов, соревнуются в том, кто первым сможет среагировать на данный образ. Необходимый эффект конкуренции нейронов за паттерн обеспечивается наличием латеральных связей с тормозящими синапсами (рис. 2). Первый среагировавший выходной нейрон, считая себя победителем, подавляет возможности остальных нейронов далее подстраивать задержки на своих синапсах под данный образ, при этом задержки на синапсах к самому нейрону-победителю продолжают подстраиваться.

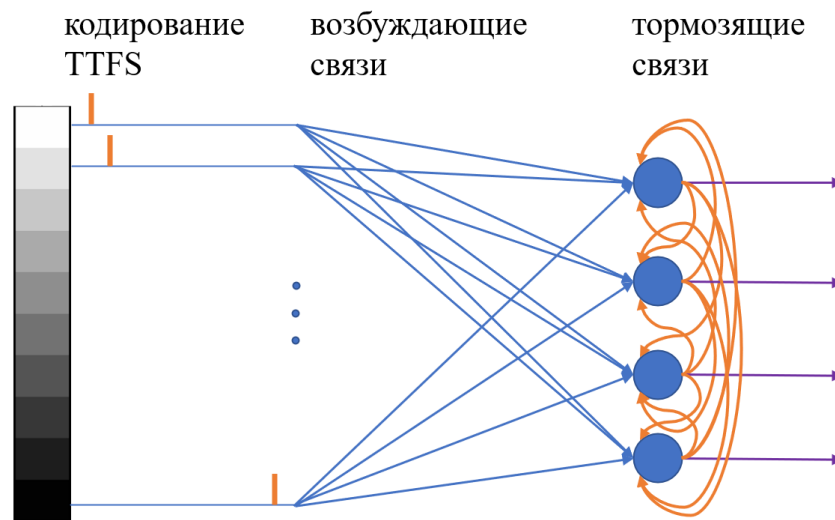


Рис. 2. Предлагаемая архитектура сети с кодированием паттерна временем первого спайка (TTFS)

Для распознавания четырех контрастных изображений достаточно взять четыре нейрона модели leaky-integrate-and-fire (LIF), где в уравнении изменения мембранного потенциала v необходимо учесть суммарную проницаемость g_n синапсов нейрона:

$$\tau_n \frac{dv}{dt} = v_{rest} - v + g_n(E_{exc} - v), \#(1)$$

$$g_n = \sum_{synapses} g. \#(2)$$

Здесь v_{rest} – потенциал покоя мембраны нейрона, E_{exc} – равновесный потенциал каналов мембраны нейрона, τ_n – постоянная времени изменения мембранного потенциала нейрона. При достижении мембранным потенциалом нейрона некоторого порога активации, нейрон генерирует собственный спайк, что интерпретируется как реакция на экспонируемый паттерн.

Проницаемость g конкретного синапса нейрона принимает ненулевое значение g_{amp} в момент времени t_{pre_delay} (время прихода спайка на

данный синапс с учетом текущей задержки на синапсе) и затем за время τ_s экспоненциально спадает до нуля:

$$g = g_{amp} e^{-(tpre_{delay} - t)/\tau_s}, \quad t > tpre_{delay}, \#(3)$$

$$tpre_{delay} = tpre + delay. \#(4)$$

Таким образом, согласно приведенным уравнениям 1-4, меняя задержки на синапсах нейрона, можно управлять моментами времени, когда проницаемость синапса становится ненулевой и происходит увеличение мембранного потенциала нейрона. Если задержки на синапсах нейрона таковы, что большинство спайков приходят с небольшой разницей по времени, то увеличение мембранного потенциала несколько раз подряд приведет к тому, что мембранный потенциал преодолет порог активации нейрона – нейрон сгенерирует спайк и начнет «запоминать» изображение, подавляя способности остальных нейронов к запоминанию данного изображения. На экспозиции следующего изображения выигравший нейрон будет уже менее восприимчив к обучению – это можно осуществить, уменьшая скорость обучения LearningRate при каждой активации нейрона, – и бороться за новый паттерн будут оставшиеся нейроны.

Предлагаемое в данной работе обучающее правило состоит в следующем: времена спайков, приходящих на выходной нейрон от входных нейронов с учетом синаптической задержки, постепенно должны приближаться к определенному синхронизационному моменту времени. С точки зрения реализации правила, это можно описать следующим образом:

On PRE (on presynaptic spike):

$$\Delta delay = LearningRate \cdot (tpre_{target} - tpre_{delayed})$$

$$delay += \Delta delay$$

On POST (on postsynaptic spike):

$$LearningRate *= 0.8$$

Здесь $tpre_{target}$ – целевой момент синхронизации приходящих спайков, который был выбран как момент времени первого пришедшего спайка в данной экспозиции $tpre_{first}$ с учетом некоторого фиксированного периода max_spike_time (рис. 3):

$$tpre_{target} = tpre_{first} + max_spike_time. \#(5)$$

Чтобы определились нейроны-победители для всех четырех образов оказалось достаточным экспонировать каждый образ 5 раз. Вначале экспонировалось «левое» изображение, затем «правое», затем «центральное» и в конце «краевое».

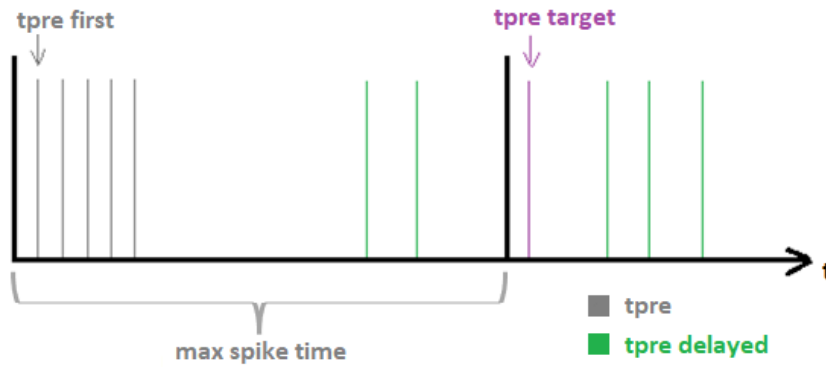


Рис. 3. Схематичное взаимное расположение на временной оси переменных и констант, участвующих в описании обучающего правила

На рисунке 4 можно проследить процесс изменения задержек на синапсах всех четырех выходных нейронов от первого и последнего (десятого) входного нейрона. Начальные задержки были заданы произвольным образом. Видно, что четвертый нейрон побеждает на третьей экспозиции «левого» (самого первого) изображения: подстраивает свои синаптические задержки под данное «левое» изображение, подавляя попытки остальных нейронов подстроить задержки на своих синапсах. В итоге финальная задержка на синапсе четвертого выходного нейрона от первого входного нейрона (со стороны самого яркого левого пикселя) максимальна, а от последнего входного нейрона (со стороны самого темного правого пикселя) минимальна, что приводит к синхронизации спайков на данных синапсах при экспозиции «левого» изображения.

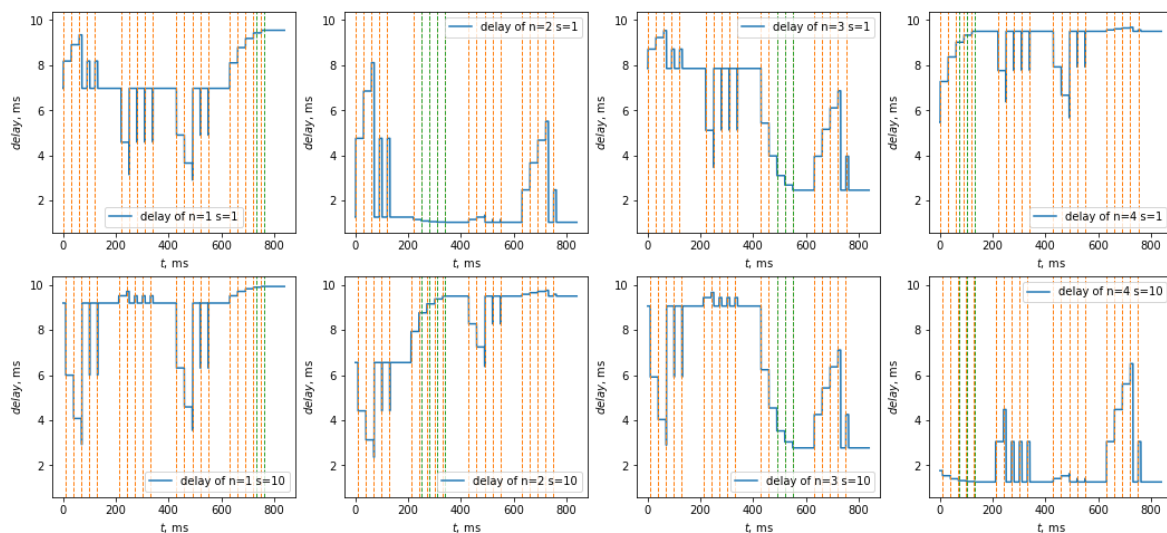


Рис. 4. Изменение задержек на синапсах каждого из четырех выходных нейронов: верхний ряд – от первого входного нейрона, нижний ряд – от последнего входного нейрона; вертикальные оранжевые пунктирные линии – пресинаптические спайки, вертикальные зеленые пунктирные линии – постсинаптические спайки

Аналогичным образом происходит обучение второго выходного нейрона, который побеждает на второй экспозиции «правого» изображения и, в конечном итоге, имеет зеркальные задержки на синапсах (от минимальной к максимальной). Третий выходной нейрон побеждает на третьей экспозиции «центрального» изображения и имеет минимальные финальные задержки на синапсах от первого и последнего нейрона. Наконец, первому выходному нейрону остается подстраиваться под последнее изображение – изображение со смещением яркости «по краям». В результате задержки на синапсах от крайних нейронов максимальны. Сравнить начальные (до обучения) и финальные (после обучения) задержки на синапсах выходных нейронов можно, посмотрев на рисунок 5.

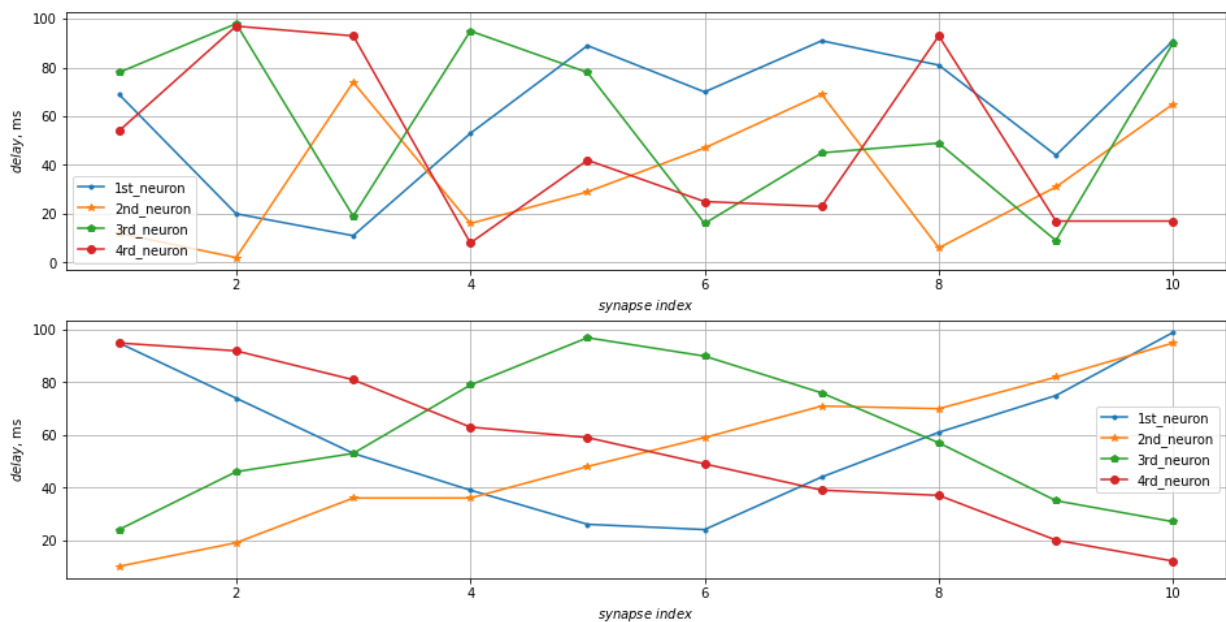


Рис. 5. Распределение задержек на синапсах: до обучения – верхний график, после обучения – нижний график

На тестировании тридцатью слабо зашумленными вариантами данных изображений обученная нейронная сеть показала стопроцентный результат точности распознавания.

В качестве дополнительного исследования был проведен эксперимент по снижению контрастности изображений с сохранением средней яркости пикселей. Изменение точности распознавания, как результат данного эксперимента, можно наблюдать на рисунке 6.

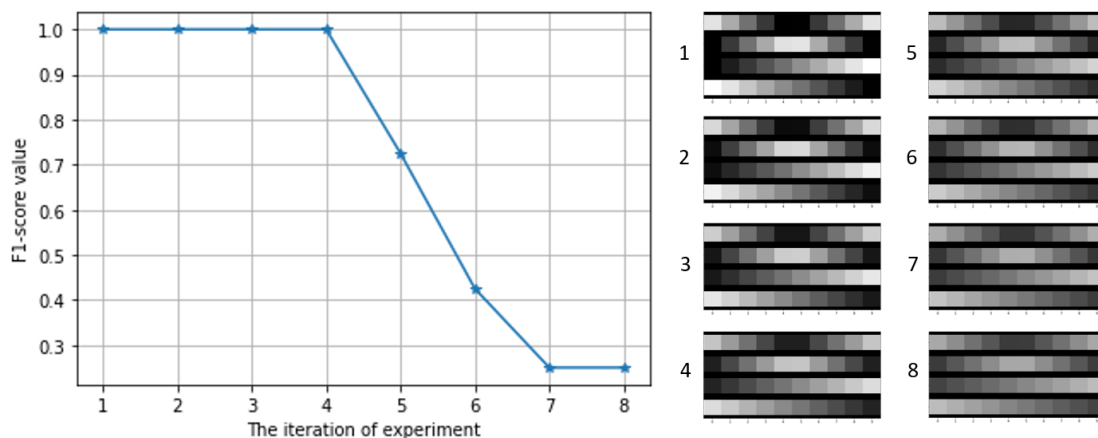


Рис. 6. Слева: график изменения F1-меры в течение проведения эксперимента по снижению контрастности изображений; справа: соответствующие итерациям эксперимента усредненные изображения

Заключение. Синаптическая пластичность – способность синапса изменять свои характеристики под влиянием внешних факторов – один из ключевых механизмов, обеспечивающих обучение биологических нейронных сетей. Исследуемой в данной работе характеристикой является временная задержка спайка на синапсе.

Рассматривается новое правило обучения импульсной нейронной сети, основанное на синхронизации поступающих в нейрон спайков путем изменения временных задержек на его синапсах.

Приводятся результаты моделирования импульсной нейронной сети, успешно обученной введенным правилом распознавать четыре контрастных образа. Ввиду акцентов работы на описании и понимании внутрисетевых процессов, в исследовании исключались любые возможные усложнения системы: выбрана однослойная сеть из четырех нейронов модели leaky-integrate-and-fire с подавляющими латеральными связями, обеспечивающими конкуренцию за экспонируемый паттерн. Образы кодировались временем первого спайка (TTFS). Также в работе приводятся результаты распознавания сетью изображений сниженной контрастности.

Библиографический список

1. Botzheim, J. Human gesture recognition for robot partners by spiking neural network and classification learning / J. Botzheim, T. Obo, N. Kubota // The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and The 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems. – IEEE, 2012. – P. 1954-1958.
2. Ratnasingam, S. A spiking neural network for tactile form-based object recognition / S. Ratnasingam, T.M. McGinnity // The 2011 International Joint Conference on Neural Networks. – IEEE, 2011. – P. 880–885.

3. Fang, H. Spiking neural networks for cortical neuronal spike train decoding / H. Fang, Y. Wang, J. He // *Neural Computation*. – 2010. – Vol. 22, No 4. – P. 1060–1085.
4. Furber, S.B. The spinnaker project / S.B. Furber, F. Galluppi, S. Temple, L.A. Plana // *Proceedings of the IEEE*. – 2014. – Vol. 102, No 5. – P. 652–665.
5. Hopkins, M. Spiking neural networks for computer vision / M. Hopkins, G. Pineda-García, P.A. Bogdan, S.B. Furber // *Interface Focus*. – 2018. – Vol. 8, No 4. – P. 1–18.
6. Mosbacher, Y. Toward neuroprosthetic real-time communication from in silico to biological neuronal network via patterned optogenetic stimulation / Y. Mosbacher, F. Khojatee, M. Goldin et al. // *Scientific reports*. – 2020. – Vol. 10, No 1. – P. 1–16.
7. Nadafian, A. Bio-plausible Unsupervised Delay Learning for Extracting Temporal Features in Spiking Neural Networks [Электронный ресурс] / A. Nadafian, M. Ganjtabesh // *arXiv.org*, 2020. – Дата обновления: 18.11.2020. – URL: <https://arxiv.org/abs/2011.09380> (дата обращения: 18.04.2022).
8. Hazan, H. Memory via Temporal Delays in weightless Spiking Neural Network [Электронный ресурс] / H. Hazan, S. Caby, C. Earl, H. Siegelmann, M. Levin // *arXiv.org*, 2022. – Дата обновления: 15.02.2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2202.07132> (дата обращения: 18.04.2022).

ОПТИМИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРА

И.А. Яковлев, А.В. Елизарова

В работе приводятся варианты решения задачи оценки состояния заряда аккумулятора. Определяется эффективность применения авторегрессионных нейронных сетей временных рядов. На основе экспериментов делаются выводы об эффективности архитектуры каждой из нейронных сетей по параметрам алгоритма обучения, количества нейронов в скрытом слое и количеству эпох. Критерием качества выступает среднеквадратическое значение ошибки прогнозирования. Оптимизируется архитектура нейронной сети по среднеквадратической ошибке прогнозирования.

Ключевые слова: оптимальная архитектура нейронной сети, нейросетевое моделирование, литий-ионный аккумулятор, оценка состояния заряда аккумулятора.

Из-за сложной природы процесса разряда аккумулятора, классические методы, основанные на физических законах, зачастую дают недостаточную точность прогнозирования состояния заряда аккумулятора. В работе предлагается применение нейронной сети. Поэтому одной из актуальных задач является отслеживание состояния заряда аккумулятора в реальном времени для учета оставшегося времени работы системы в заданном режиме. В работе предлагается использовать нейронную сеть для определения уровня разряда аккумулятора.

Зависимость напряжения разряда аккумуляторной батареи от времени представляет собой нелинейный процесс. Такой процесс является сложным и может быть описан эмпирическими соотношениями с большим количеством входных параметров, среди которых имеются экспериментальные константы. Из-за большого количества неуточненных заранее параметров и в силу естественных эффектов аккумулятора применение эмпирических зависимостей на практике становится невозможным. Помимо этого, такие параметры как температура аккумулятора, токи разряда/заряда, количество циклов перезаряда влияют на скорость деградации емкости аккумулятора, функция которой также имеет нелинейный характер [1, 2].

Таким образом, так или иначе приходится идентифицировать объект исследования. Увеличение входных параметров пропорционально вызывает сложности в их уточнении и оценки адекватности получаемого результата, уменьшение входных параметров заставляет чаще обращаться

к идентификации реальных параметров аккумулятора, занимая тем самым полезное время и прерывая его работу. Непрерывность в работе аккумуляторной батареи может стать принципиальным условием в зависимости от приложения [3].

От части вопрос компромисса между количеством входных параметров и идентификацией реальных параметров аккумулятора решается применением интеллектуальных методов, в частности нейронных сетей. Нейронная сеть, в основе которой содержатся весовые коэффициенты, позволяет найти зависимость между входными и выходными значениями, путем настройки этих весовых коэффициентов. Процесс настройки весовых коэффициентов называется обучением. Тогда задача прогнозирования состояния заряда аккумулятора сводится к определению входных параметров, данных, используемых для обучения и выбору архитектуры нейронной сети.

В процессе проектирования нейронной сети встает вопрос о выборе верной архитектуры. Архитектура определяет фундаментальные правила организации слоев, нейронов и связей между ними в нейронной сети. Так же, как и для задач прогнозирования временных рядов разработаны такие архитектуры как нейронные сети прямого распространения и рекуррентные нейронные сети [4].

Перед началом формирования обучающей выборки необходимо обеспечить ее репрезентативность и непротиворечивость данных. Данные, собранные с датчиков, зачастую имеют шумы и выбросы, от которых необходимо избавиться. Частота дискретизации данных составляет 10 секунд.

Конфигурация обучения у всех нейронных сетей, следующая:

- максимальное число эпох в процессе обучения составляет 10000;
- количество задержек по обратной связи у всех нейронных сетей составляет 20 единиц;
- разделение обучающих данных – блочное;
- часть обучающей выборки составляет 70% от общего числа данных;
- часть тестовой выборки составляет 15% от общего числа данных;
- часть контрольной выборки составляет 15% от общего числа данных.

В качестве обучающей выборки выступают данные NASA по разряду литий-ионного аккумулятора емкостью 2Ач. В наборе имеются данные по напряжению на клеммах аккумулятора (U , В), времени разряда по каждому циклу (τ , сек.), току нагрузки (I , А) и температуре аккумулятора (T , °С).

Создание нейронной сети осуществляется с использованием MATLAB и пакета `ntstool` [3]. Функции создания NAR и NARX сети `narnewt` и `narxnewt` соответственно.

Нелинейная авторегрессионная нейронная сеть использует на входе только вектор значений напряжения, описывающий процесс разряда аккумулятора, и по предыдущим значениям прогнозирует последующее на шаг вперед.

Классическая архитектура последовательно-параллельной нелинейной авторегрессионной нейронной сети с 32 нейронами в одном скрытом слое и 20 единицами задержек по обратной связи изображена на рис. 1.

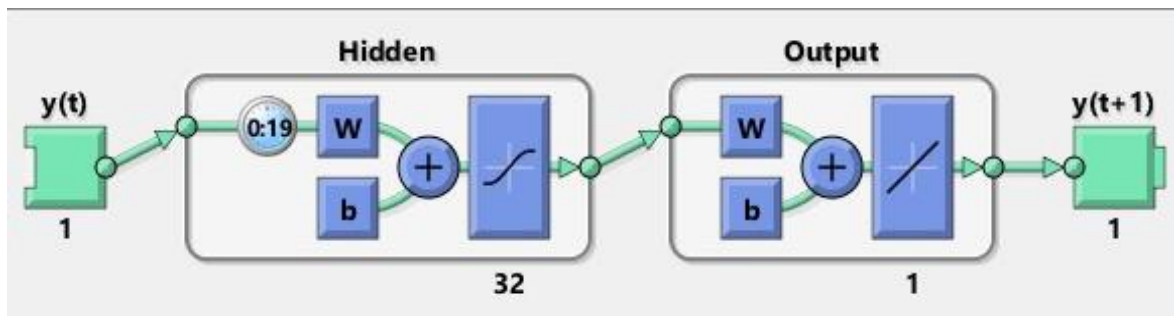


Рис. 1. Классическая архитектура последовательно-параллельной нелинейной авторегрессионной нейронной сети

Можно видеть, как сильно меняется ошибка прогнозирования от количества нейронов в нейронной сети. Сильнее всего количество нейронов на ошибку прогнозирования влияет в случае применения алгоритма обучения байесовской регуляризации и меньше всего в случае применения алгоритма обучения масштабируемого сопряженного градиента. Данные зависимости показаны на рис. 2.

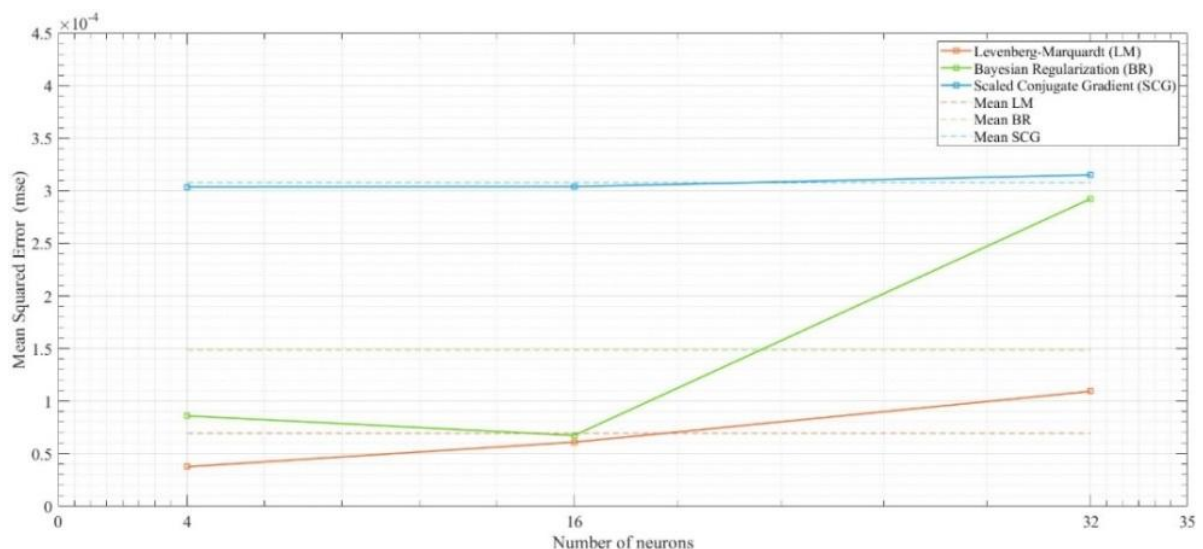


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичной ошибки от количества нейронов нелинейной авторегрессионной нейронной сети на разных алгоритмах обучения

Также следует обратить внимание на количество эпох, необходимых для достижения минимальной ошибки прогнозирования. В случае использования алгоритма Левенберга-Маркварда можно наблюдать обратно-пропорциональную зависимость между количеством нейронов в скрытом слое и количестве эпох по достижению минимальной ошибки. Обратную картину можно видеть при использовании алгоритма масштабируемых сопряженных градиентов, где количество эпох пропорционально возрастает с увеличением количества нейронов в скрытом слое. В алгоритме байесовской регуляризации количество эпох сначала пропорционально возрастает до какого-то определенного количества нейронов, а потом обратно-пропорционально, с увеличением количества нейронов в скрытом слое уменьшается количество требуемых эпох по достижению минимальной ошибки. Более подробно это можно наблюдать графически на рис. 3.

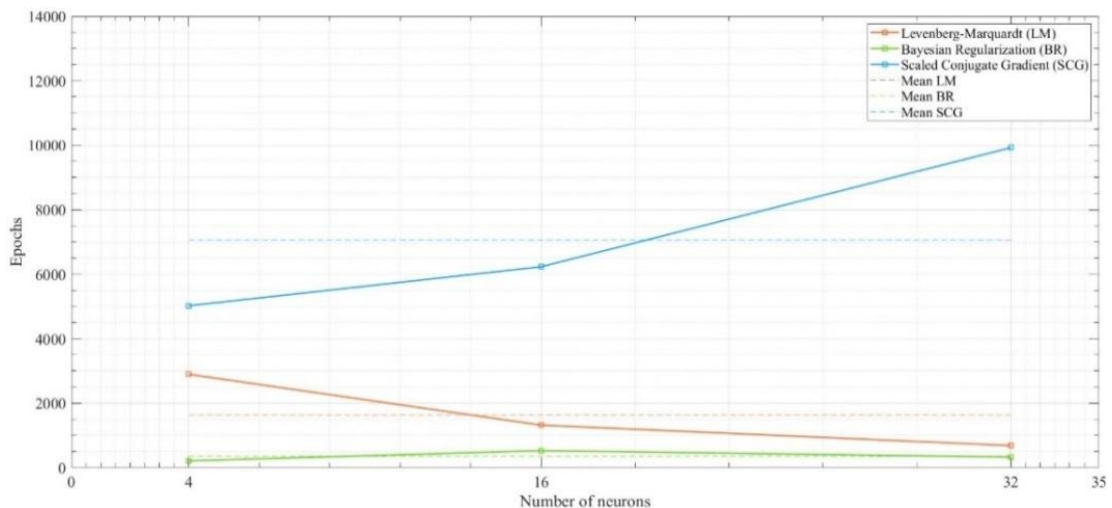


Рис. 3. Зависимость требуемых количеств эпох от количества нейронов нелинейной авторегрессионной нейронной сети на разных алгоритмах обучения

Учитывая данные, изображенные на рис. 2 и рис. 3, можно видеть, что в алгоритме масштабируемого сопряженного градиента при увеличении количества нейронов, увеличивается количество эпох, необходимых для достижения минимальной ошибки, однако ошибка при этом остается практически неизменной. В алгоритме байесовской регуляризации наблюдается соответствие увеличение количества эпох уменьшению ошибки. В общем случае количество требуемых эпох в зависимости от количества нейронов можно считать постоянным. Однако вопрос минимальной ошибки от количества нейронов в промежутке [4; 32] остается открытым. В алгоритме Левенберга-Маркварда наблюдается соответствие увеличения ошибки уменьшению количества требуемых эпох. С увеличением количества нейронов ошибка увеличивается.

По среднеквадратичной ошибке прогнозирования меньше всего от количества нейронов в скрытом слое зависят нейронные сети, обученные алгоритмом масштабируемых сопряженных градиентов и больше всего нейронные сети, обученные алгоритмом байесовской регуляризации.

По количеству эпох меньше всего от количества нейронов в скрытом слое зависят нейронные сети, обученные алгоритмом масштабируемого сопряженного градиента и больше всего нейронные сети, обученные алгоритмом Левенберга-Маркварда.

Модель нелинейной авторегрессии с внешними входами (NARX) относится к классу рекуррентных нейронных сетей. Наличие обратных связей позволяет NARX-сети принимать решения, основываясь не только на входных данных, но и с учетом предыстории состояний динамического объекта [1].

Здесь, на вход нейронной сети подаются 3 параметра – данные по времени разряда в секундах, ток нагрузки в амперах и температура ячейки в градусах Цельсия.

Классическая архитектура последовательно-параллельной нелинейной авторегрессионной нейронной сети с 32 нейронами в одном скрытом слое и 19 единицами задержек по входу и 1 задержкой по обратной связи изображена на Рис. 4. Количество задержек по внешней обратной связи позволяет делать прогноз на желаемое количество шагов. В нашем случае количество прогнозируемых шагов равняется единице.

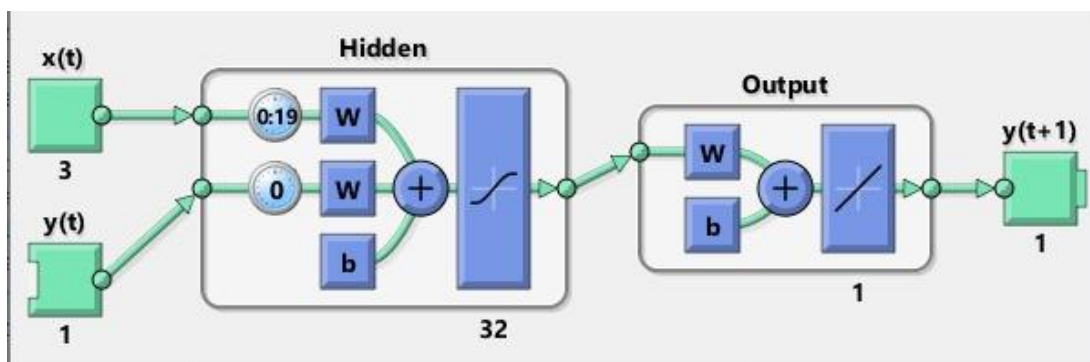


Рис. 4. Классическая архитектура последовательно-параллельной нелинейной авторегрессионной нейронной сети с внешней обратной связью

В отличие от нелинейной авторегрессионной нейронной сети в случае обучения нелинейной авторегрессионной нейронной сети с внешней обратной связью можно наблюдать общую тенденцию по всем трем алгоритмам обучения. Единственное отличие заключается в среднем значении ошибки каждого из алгоритмов. Более подробно это можно видеть на рис. 5.

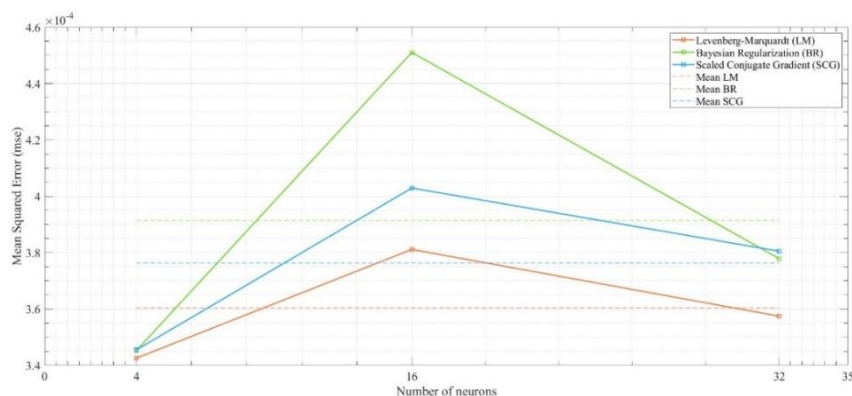


Рис. 5. Зависимость среднеквадратичной ошибки от количества нейронов нелинейной авторегрессионной нейронной сети с внешней обратной связью на разных алгоритмах обучения

Количество эпох в зависимости от алгоритма обучения меняется в значительной степени. На рис. 6 можно видеть, что алгоритмы Левенберга-Маркварда и байесовской регуляризации имеют примерно одинаковые количества эпох, в то время как масштабируемый сопряженный градиент сильно отличается от предыдущих двух. Причиной этому служит все та же разница в сложности методов.

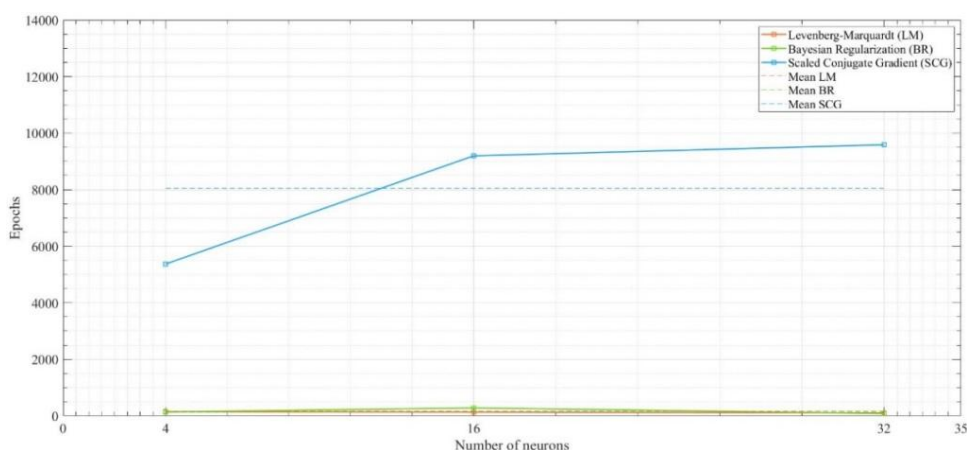


Рис. 6. Зависимость требуемых количеств эпох от количества нейронов нелинейной авторегрессионной нейронной сети с внешней обратной связью на разных алгоритмах обучения

Основным критерием качества так же, как и с нелинейной авторегрессионной нейронной сетью остается точность прогнозирования. Дополнительным критерием будет служить способность прогнозирования состояния заряда аккумулятора при разных периодах поступления входных данных. Допустимыми архитектурами будут считаться те, ошибка которых ниже средней между максимальной и минимальной по всем алгоритмам обучения и по всем количествам нейронов. Таким образом средняя ошибка будет составлять $3.9680e-04$.

Как и в нелинейной авторегрессионной нейронной сети, везде наблюдается сложность в прогнозировании третьей экспоненциальной зоны разряда аккумулятора.

По среднеквадратичной ошибке прогнозирования меньше всего от количества нейронов в скрытом слое зависят нейронные сети, обученные алгоритмом Левенберга-Маркварда и больше всего нейронные сети, обученные алгоритмом байесовской регуляризации.

По количеству эпох меньше всего от количества нейронов в скрытом слое зависят нейронные сети, обученные алгоритмом байесовской регуляризации и больше всего нейронные сети, обученные алгоритмом масштабируемого сопряженного градиента.

В условиях малого количества обучающей выборки применение нелинейной авторегрессионной нейронной сети без внешней обратной связи дает меньшую ошибку в задаче прогнозирования состояния заряда аккумулятора, чем применение той же нейронной сети с внешней обратной связью.

Так как входными параметрами для нейронной сети с внешней обратной связью являются время, ток нагрузки и температура ячейки, то все они вносят неопределенность в выходной результат.

С увеличением количества входных параметров нейронной сети для обучения необходима соразмерная обучающая выборка и такая архитектура нейронной сети, способная идентифицировать все существующие признаки, и способная найти между ними зависимость.

Таким образом в задаче прогнозирования состояния заряда аккумулятора с применением малой обучающей выборки эффективность использования последовательно-параллельной нелинейной авторегрессионной нейронной сети становится выше, чем использование последовательно-параллельной нелинейной авторегрессионной нейронной сети с внешней обратной связью и множеством входных параметров [6].

В рамках данной работы были исследованы два типа рекуррентных нелинейных авторегрессионных нейронных сетей в задаче прогнозирования состояния заряда аккумулятора в процессе его использования на малой обучающей выборке. Основным критерием качества прогнозирования выступала среднеквадратичная ошибка. Нейронная сеть тестировалась на трех испытаниях разряда аккумулятора, не участвующих в обучающей выборке.

В случае NAR нейронной сети обучение проводилось с использованием входного параметра напряжения с аккумулятора в процессе разряда. Для прогнозирования последующего значения напряжения нейронная сеть использовала на входе значения предыдущих состояний напряжения аккумулятора.

В случае NARX нейронной сети обучение проводилось с использованием таких входных параметров как относительное время разряда, ток нагрузки, температура ячейки и напряжение ячейки. Для прогнозирования последующего состояния значения напряжения нейронная сеть использовала на входе значения относительного времени, тока нагрузки, температуры ячейки и значения уточненного напряжения на предыдущих шагах.

По результатам исследования оптимальным типом нейронной сети в условиях ограниченной обучающей выборки оказалась NAR нейронная сеть с 4 нейронами в скрытом слое при 20 единицах задержки на входе в интервале [1, 16] нейронов

Библиографический список

1. CHANG W. Y. The state of charge estimating methods for battery: A review //International Scholarly Research Notices. – 2013. – Т. 2013. – 8 с.
2. TANG X. et al. Li-ion battery parameter estimation for state of charge //American Control Conference (ACC), 2011. – IEEE, 2011. – С. 941-946.
3. Галушкин Н.Е., Галушкина Н.Н. Анализ эмпирических зависимостей, описывающих разряд щелочных аккумуляторов // Электрохимическая энергетика. 2005. Т. 5, № 1. С. 43–50.
4. Саймон Хайкин. Нейронные сети. Полный курс. Второе издание: перевод с англ. – М: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
5. Саитова Г.А., Елизарова А.В. Нейросетевая модель для оценки состояния заряженности литий-ионного аккумулятора // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2021) [Электронный ресурс]: труды Международной научно-технической конференции / под ред. С.А. Прохорова. – Электрон. текстовые и граф. дан.– Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2021. – С. 288-293.
6. Гейдаров П. Ш. «Сравнительный анализ результатов обучений нейронной сети с вычисленными весовыми значениями и с генерацией весовых значений случайным образом» // Автомат. и телемех., 2020, № 7, 56–78; Autom. Remote Control, 81:7 (2020), 1211–1229 с.

СЕКЦИЯ III

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 577.977.5

ЗАДАЧА ОБХОДА МАШИНОЙ ДУБИНСА ТРЕХ НЕПОДВИЖНЫХ ТОЧЕК ЗА КРАТЧАЙШЕЕ ВРЕМЯ

А.М. Атуова

Рассматривается задача о последовательном обходе управляемым объектом трех неподвижных целевых точек за кратчайшее время. Используется модель машины Дубинса для описания движения объекта в горизонтальной плоскости с постоянной скоростью и ограниченной маневренностью. Приведена классификация взаимного расположения целевых точек. Построена оптимальная траектория сближения. Выписаны алгебраические выражения, позволяющие решить задачу в одном из подслучаев взаимного расположения точек.

Ключевые слова: машина Дубинса, задача быстрогодействия, сближение, неподвижные цели.

Введение. Впервые задача о соединении двух точек кратчайшей линией при условии, что радиус кривизны кривой ограничен, была рассмотрена А.А. Марковым в рамках проектирования железных дорог [1]. В [2] Р. Айзекс рассмотрел игровую задачу, в которой автомобиль с постоянной скоростью и ограниченным радиусом поворота сближается с уклоняющимся «пешеходом». Задача, рассмотренная А.А. Марковым, является частным случаем задачи, рассмотренной Р. Айзексом, когда «пешеход» неподвижен. Л.Э. Дубинс в работе [3] решил задачу поиска среди кривых ограниченной кривизны линии наименьшей длины, соединяющей две точки при условии, что направления выхода из начальной точки и прихода в конечную точку заданы.

Решение задачи с двумя неподвижными целями полностью исследовано Ю.И. Бердышевым в ряде работ, например, в [4]. Данная работа отличается от рассмотренных ранее наличием не двух целевых точек, а трех. Сложность заключается в невозможности разбить задачу на ряд двухточечных, так как необходимо учитывать информацию о всех целях для того, чтобы минимизировать время обхода. В этом можно убедиться, рассмотрев мотивирующий пример в [5]. В работе [6] был рассмотрен случай, когда целевых точек больше двух, и они находятся на достаточном расстоянии друг от друга, и показано, что тогда оптимальной

траекторией являются дуги окружностей и отрезки прямых, касающихся друг друга. В работах [7–8] предложен оптимальный синтез траекторий перехвата под нефиксированным и фиксированным углами для движущихся целей, который может быть применен и в случае неподвижных точек. Необходимые условия оптимальности в форме принципа максимума Л.С. Понтрягина и условий выравнивания функции Понтрягина для случая трех целей можно получить аналогично [4]. Последнее в силу громоздкости выкладок и известного результата приводиться не будет.

Основная часть. В качестве управляемого объекта воспользуемся машиной Дубинса, имеющей простейшую модель движения в горизонтальной плоскости. Это движение описывается следующей системой уравнений, которая соответствует постоянной скорости, равной 1:

$$\begin{cases} \dot{x} = \cos\varphi, \\ \dot{y} = \sin\varphi, \\ \dot{\varphi} = u. \end{cases}$$

В этой системе x, y – декартовы координаты управляемого объекта на плоскости, φ – угол между скоростью объекта и осью x , u – управление, которое является скоростью изменения угла φ и удовлетворяет ограничению $|u| \leq 1$.

Начальные условия считаются заданными

$$x(t_0) = x_0, y(t_0) = y_0, \varphi(t_0) = \varphi_0.$$

Координаты точек $W_i, i = \overline{1,3}$, которые необходимо обойти, также заданы и равны (x_i, y_i) соответственно.

Задача состоит в поиске оптимального управления и минимизации критерия качества

$$J[u] = \int_0^T dt \rightarrow \min_{u(\cdot)},$$

где $T \in R_0^+$, при условии

$$K_i(t_i) = 0, i = \overline{1,3}.$$

В данном случае K_i – двумерные функции, компоненты которых равны $K_{ix} = x - x_i, K_{iy} = y - y_i, i = \overline{1,3}$.

Для построения оптимальной траектории необходимо рассмотреть всевозможные взаимные расположения точек $W_i, i = \overline{1,3}$. Также, существенными являются расстояния между точками обхода $W_{i-1}W_i$. Пусть $r_i, i = \overline{1,3}$ – расстояние между точками $W_{i-1}W_i$, R – минимально возможный радиус поворота (для выбранного объекта $R = 1$), и обход точек осуществляется в порядке возрастания их номеров. Тогда возможны четыре варианта соотношений:

$$1) \quad r_1 \geq 4R, r_2 \geq 4R, r_3 > 2R,$$

- 2) $r_1 \geq 4R, r_2 \geq 4R, r_3 < 2R,$
- 3) $r_1 \geq 4R, r_2 < 4R, r_3 < 2R,$
- 4) $r_1 < 4R, r_2 < 4R, r_3 < 2R.$

Рассмотрим первый случай, который можно разбить на следующие подслучаи 1.а) поворот машины происходит в одном направлении (например, по часовой стрелке), 1.б) поворот машины происходит в разных направлениях, 1.в) комбинация подслучаев а и б, который в свою очередь можно разбить еще на четыре варианта (например, при обходе первых двух точек поворот осуществляется по часовой стрелке, а далее против). На рис.1 изображен один из вариантов подслучая 1.б, когда направления поворотов чередуются.

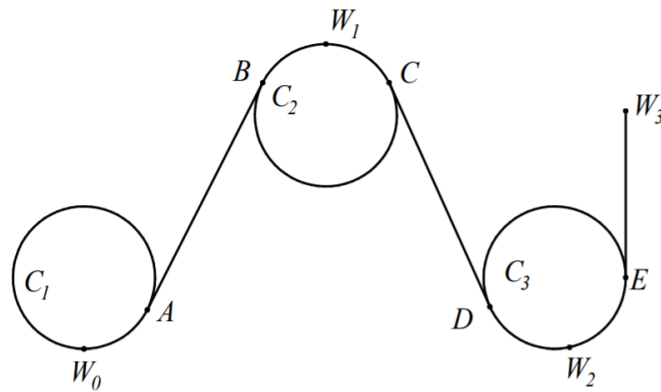


Рис. 1. Оптимальная траектория сближения машины Дубинса с тремя неподвижными целями при условии, что $r_1 \geq 4R, r_2 \geq 4R, r_3 > 2R$

Рассмотрим подслучай 1.а, когда поворот машины происходит против часовой стрелки. Пусть точка W_0 соответствует начальному положению $x(t_0) = x_0$, точки $W_i, i = \overline{1,3}$ являются целевыми. В силу теоремы 7.1 [6] оптимальное управление исследуемого управляемого объекта удовлетворяет принципу максимума и условиям выравнивания. Далее по аналогии с двухточечной задачей [4] можно показать, что из геометрического смысла получающихся уравнений вытекает то, что точки $W_{1,2}$ делят дуги BW_1C и DW_2E пополам. Таким образом, оптимальная траектория действительно состоит из дуг окружностей единичного радиуса и отрезков прямых, соединяющих их, при этом дуги и отрезки касаются друг друга.

В качестве неизвестных выберем углы α и β между осью абсцисс и лучами, исходящими из точек W_1, W_2 и проходящими через центры $M(x_M, y_M), N(x_N, y_N)$ окружностей C_M, C_N . Легко заметить, что

$$\begin{aligned} x_M &= x_1 + R \cos \alpha, y_M = y_1 + R \sin \alpha, \\ x_N &= x_2 + R \cos \beta, y_N = y_2 + R \sin \beta. \end{aligned}$$

Зная углы α и β , находим углы θ, γ, δ , которые определяют прямолинейные участки движения AB, CD, EW_3 . Если $x_M \neq 0$, то $\theta = \arctan(\frac{y_M - R}{x_M})$, иначе $\theta = \pi/2$. Если $x_M \neq x_N$, то $\gamma = \arctan(\frac{y_N - y_M}{x_N - x_M})$, иначе $\gamma = \pi/2$. Последний угол определяется равенством $\delta = 2\arctan q$, где q - решение квадратного уравнения

$$(R + y_3 - y_N)q^2 + 2q(x_3 - x_N) + (R - y_3 + y_N) = 0.$$

Уравнения для определения α и β имеют вид

$$\theta + \gamma + \pi = 2\alpha, \gamma + \delta + \pi = 2\beta$$

и отражают тот факт, что точки W_1 и W_2 делят соответствующие им дуги пополам. Длины $d_i, i = \overline{1,3}$ прямолинейных участков траектории определяются по формулам

$$d_1 = |x_M \cos\theta + (y_M - R) \sin\theta|, d_2 = |(x_2 - x_M) \cos\gamma + (y_2 - y_M) \sin\gamma|, \\ d_3 = |(x_3 - x_N) \cos\delta + (y_3 - y_N) \sin\delta|.$$

Для начальных значений α_0 и β_0 найдено, что

$$\alpha_0 = (\theta_0 + \gamma_0 + \pi)/2, \beta_0 = (\gamma_0 + \delta_0 + \pi)/2,$$

где $\theta_0, \gamma_0, \delta_0$ определяются по формулам

$$\theta_0 = \begin{cases} \arctan y_1/x_1, & \text{если } x_1 \neq 0, \\ \pi/2, & \text{если } x_1 = 0, \end{cases} \gamma_0 \\ = \begin{cases} \arctan(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1), & \text{если } x_1 \neq x_2, \\ \pi/2, & \text{если } x_1 = x_2, \end{cases} \\ \delta_0 = \begin{cases} \arctan(y_3 - y_2)/(x_3 - x_2), & \text{если } x_2 \neq x_3, \\ \pi/2, & \text{если } x_2 = x_3. \end{cases}$$

На рис. 2 изображена оптимальная траектория сближения.

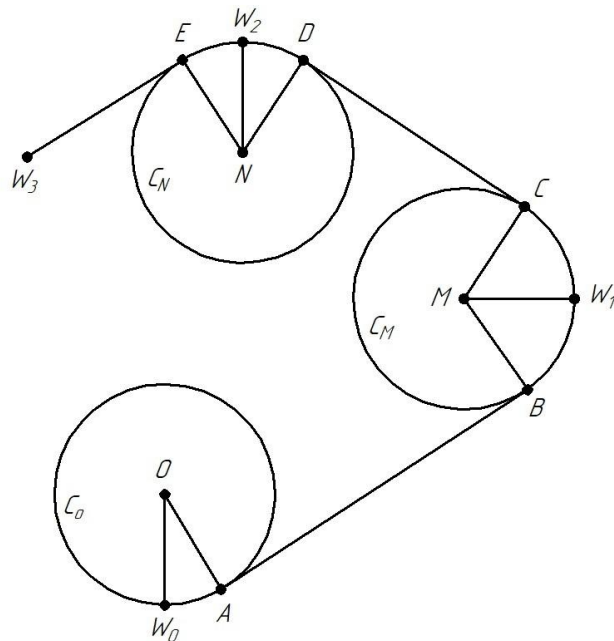


Рис. 2. Оптимальная траектория сближения машины Дубинса с тремя неподвижными целями в случае 1.а

Заключение. Для задачи обхода машиной Дубинса трех неподвижных точек за кратчайшее время проведена классификация возможных случаев взаимного расположения целевых точек. Классификация случая 1 рассмотрена более подробно. Для подслучая 1.а описан алгоритм построения оптимальной траектории, приведены выражения, однозначно определяющие вид оптимальной траектории. Дальнейшие исследования этой задачи связаны с рассмотрением других случаев взаимного расположения целевых точек, а также с обходом целей под нефиксированным углом и сравнительным анализом полученных результатов.

Библиографический список

1. Марков, А.А. Несколько примеров решения особого рода задач о наибольших и наименьших величинах / А.А. Марков // Сообщ. Харьков. мат. общ. – 1889. – Т.1, вып. 2. – С. 250–276.
2. Айзекс, Р. Дифференциальные игры / Р. Айзекс. – М.: Мир, 1967. – 480 с.
3. Dubins, L.E. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents / L.E. Dubins // American. J. Math. – 1957. – Vol. 79, no. 3. – P. 497–516.
4. Бердышев, Ю.И. О задаче обхода нелинейной управляемой системой третьего порядка двух точек / Ю.И. Бердышев // Известия Уральского государственного университета. – 2003. – № 26. – С. 24-33.
5. Бердышев, Ю.И. Задача последовательного обхода нелинейным управляемым объектом совокупности гладких многообразий / Ю.И. Бердышев // Дифференц. уравнения. – 2002. – Т. 38, вып. 11. – С. 1451–1461.
6. Бердышев, Ю.И. Нелинейные задачи последовательного управления и их приложение: Монография / Ю.И. Бердышев. – Екатеринбург: УрО РАН, 2015. – 193 с.
7. Бузиков, М.Э. Алгоритмы вычисления оптимальной траектории перехвата подвижной цели машиной Дубинса / М.Э. Бузиков, А.А. Галяев // Материалы XIV мультikonференции: сб.тр.конф. в 4 т. Т. 1 – Ростов-на-Дону, 2021. – С.73-76.
8. Buzikov, M.E. Minimum-time lateral interception of a moving target by a dubins car / M.E. Buzikov, A.A. Galyaev // Automatica. – 2022. – Vol. 135. –P. 109968.

НЕПРЕРЫВНОСТЬ КРИТЕРИЯ В ЗАДАЧЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ДВУХ НЕСИНХРОННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ

Л.М. Берлин, А.А. Галяев

Рассматривается задача оптимального управления двумя несинхронными осцилляторами по критерию быстрогодействия с ограниченным и скалярным управлением. В зависимости от количества переключений управления найдены достаточные условия непрерывности полного времени движения системы, как функции от ограничения на управление. Для случая трех и четырех переключений показана связь условия непрерывности критерия задачи и условия невырожденности управления, которое является частью необходимых условий экстремума.

Ключевые слова: принцип максимума, оптимальное управление, осцилляторы.

Введение. Для системы двух несинхронных осцилляторов со скалярным и ограниченным управлением рассматривается задача оптимального управления по критерию быстрогодействия. Задача синтеза для одиночного осциллятора с критерием быстрогодействия была решена В.Г. Болтянским в [1]. Подобная задача для двух осцилляторов в случае недостатка ресурса управления была рассмотрена академиком РАН Ф.Л. Черноусько в монографии [2]. В работе [3] получены необходимые условия экстремума, позволяющие рассматривать указанную задачу с управлением, имеющим более трех переключений. Также рассмотрено некоторое множество на фазовой плоскости первого осциллятора, как его различные конечные состояния, после чего были отмечены области классов трех и четырех переключений. Для второго осциллятора конечным состоянием является начало координат. Данная работа посвящена исследованию непрерывности общего времени движения системы по параметру задачи, а именно, по ограничению на управление для каждого выбранного класса.

Основная часть. Задача оптимального управления двумя несинхронными осцилляторами со скалярным управлением по критерию быстрогодействия формулируется следующим образом:

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{p}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{p}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_1 \\ -\omega_1^2 q_1 \\ p_2 \\ -\omega_2^2 q_2 \end{pmatrix} + u \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, x = (q_1, p_1, q_2, p_2)^T \in \mathbb{R}^4 = M, u \in [-\varepsilon, \varepsilon] = U, \quad (1)$$

где q_i , p_i , ω_i – координата, импульс и собственная частота колебаний i -го осциллятора соответственно, $i = 1, 2$, u – управляющее воздействие. Особенность данной задачи заключается в том, что размерность вектора управляющего воздействия меньше размерности системы. В работе [4]

доказано, что система (1) обладает свойством сильной достижимости и глобальной управляемости. Граничные условия выбираются следующим образом:

$$x(0) = (0,0,0,0)^T, \quad x(T_0) = (q_1^{T_0}, p_1^{T_0}, 0,0)^T. \quad (2)$$

Задача решается по критерию быстродействия

$$T_0 = \int_0^{T_0} dt \rightarrow \min. \quad (3)$$

Оптимальное управления $u^*(t)$ было получено в [3] с использованием геометрической формулировки принципа максимума Понтрягина

$$u^*(t) = \varepsilon \operatorname{sign}(C_1 \cos(\omega_1 t) + C_2 \sin(\omega_1 t) + C_3 \cos(\omega_2 t) + C_4 \sin(\omega_2 t)), \quad (4)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – некоторые константы.

Формула (4) показывает, что управление является кусочно-постоянным, в связи с чем вводятся следующие обозначения: $K - 1$ – количество переключений управления, которые происходят в моменты $t_i, i = \overline{1, K - 1}$, τ_n – длительность n -го интервала постоянства управления, $n = \overline{1, K}$. Связь этих величин и оптимального управления показана на рис. 1.

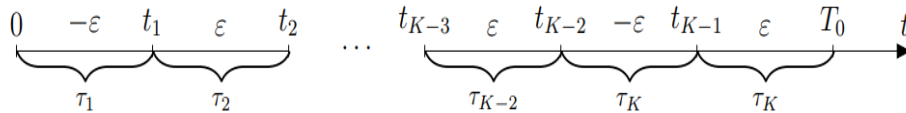


Рис. 1. Вид оптимального управления $u^*(t)$

Решение задачи оптимального управления должно удовлетворять [3] совместной системе, состоящей из уравнений динамики

$$\begin{cases} 2 \sum_{j=1}^K (-1)^{j+1} \cos(\omega_1 \sum_{i=j}^K \tau_i) - \cos(\omega_1 \sum_{i=1}^K \tau_i) = (-1)^{K-1} + (-1)^{k+1} \frac{q_1^{T_0} \omega_1^2}{\varepsilon}, \\ 2 \sum_{j=1}^K (-1)^{j+1} \sin(\omega_1 \sum_{i=j}^K \tau_i) - \sin(\omega_1 \sum_{i=1}^K \tau_i) = (-1)^k \frac{p_1^{T_0} \omega_1}{\varepsilon}, \\ 2 \sum_{j=1}^K (-1)^{j+1} \cos(\omega_2 \sum_{i=j}^K \tau_i) - \cos(\omega_2 \sum_{i=1}^K \tau_i) = (-1)^{K-1}, \\ 2 \sum_{j=1}^K (-1)^{j+1} \sin(\omega_2 \sum_{i=j}^K \tau_i) - \sin(\omega_2 \sum_{i=1}^K \tau_i) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

и условий невырожденности управления

$$\det \begin{pmatrix} \cos(\omega_1 t_i) & \cos(\omega_1 t_{i+1}) & \cos(\omega_1 t_{i+2}) & \cos(\omega_1 t_{i+3}) \\ \sin(\omega_1 t_i) & \sin(\omega_1 t_{i+1}) & \sin(\omega_1 t_{i+2}) & \sin(\omega_1 t_{i+3}) \\ \cos(\omega_2 t_i) & \cos(\omega_2 t_{i+1}) & \cos(\omega_2 t_{i+2}) & \cos(\omega_2 t_{i+3}) \\ \sin(\omega_2 t_i) & \sin(\omega_2 t_{i+1}) & \sin(\omega_2 t_{i+2}) & \sin(\omega_2 t_{i+3}) \end{pmatrix} = 0, \quad i = \overline{1, K - 4}, \quad (6)$$

которая и формирует необходимые условия экстремума для задачи оптимального управления (1) - (3). Управление на первом интервале может быть выбрано как ε , так и $-\varepsilon$, для чего вводится параметр k , равный 0 и 1

соответственно. Для управления с тремя переключениями условие невырожденности отсутствует.

Исследование вопроса непрерывности критерия задачи сводится к применению теоремы о неявной функции [5] для системы уравнений. Якобиан системы (5) и (6) для управления, имеющего $K - 1$ переключение, обозначается J_{K-1} .

$$J_{K-1} = \det \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \tau_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \tau_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \tau_K} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \tau_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \tau_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial \tau_K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_K}{\partial \tau_1} & \frac{\partial f_K}{\partial \tau_2} & \dots & \frac{\partial f_K}{\partial \tau_K} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где через f_1, f_2, f_3, f_4 обозначены уравнения движения (5), а f_5, \dots, f_K относятся к условиям невырожденности управления (6). Проведя элементарные преобразования над определителем (7) и подставляя решения уравнений динамики (5), его можно представить в следующем виде

$$J_{K-1} = (-1)^{\lfloor \frac{K}{2} \rfloor} 8\omega_1^2 \omega_2^2 \det \begin{pmatrix} \sin(\omega_1 \sum_{i=1}^K \tau_i) & \sin(\omega_1 \sum_{i=K}^K \tau_i) \\ \cos(\omega_1 \sum_{i=1}^K \tau_i) & \cos(\omega_1 \sum_{i=K}^K \tau_i) \\ \sin(\omega_2 \sum_{i=1}^K \tau_i) & \dots & \sin(\omega_2 \sum_{i=K}^K \tau_i) \\ \cos(\omega_2 \sum_{i=1}^K \tau_i) & \dots & \cos(\omega_2 \sum_{i=K}^K \tau_i) \\ 2 \frac{\partial f_5}{\partial \tau_1} & \dots & (-1)^{K+1} \left(\frac{\partial f_5}{\partial \tau_K} - \frac{\partial f_5}{\partial \tau_{K-1}} \right) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 2 \frac{\partial f_K}{\partial \tau_1} & \dots & (-1)^{K+1} \left(\frac{\partial f_K}{\partial \tau_K} - \frac{\partial f_K}{\partial \tau_{K-1}} \right) \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Лемма 1. Если выполнено условие $J_{K-1} \neq 0$, то в классе $K - 1$ переключения критерий задачи быстродействия $T_0(\varepsilon)$ является непрерывной функцией.

В качестве примера рассматриваются случаи 3-х и 4-х переключений. Условие непрерывности $T_0(\varepsilon)$ для $K - 1 = 3$ по Лемме 1 имеет вид

$$\begin{aligned} & \frac{J_3}{8\omega_1^2 \omega_2^2} = \\ & = \det \begin{pmatrix} \sin(\omega_1(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4)) & \sin(\omega_1(\tau_2 + \tau_3 + \tau_4)) & \sin(\omega_1(\tau_3 + \tau_4)) & \sin(\omega_1 \tau_4) \\ \cos(\omega_1(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4)) & \cos(\omega_1(\tau_2 + \tau_3 + \tau_4)) & \cos(\omega_1(\tau_3 + \tau_4)) & \cos(\omega_1 \tau_4) \\ \sin(\omega_2(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4)) & \sin(\omega_2(\tau_2 + \tau_3 + \tau_4)) & \sin(\omega_2(\tau_3 + \tau_4)) & \sin(\omega_2 \tau_4) \\ \cos(\omega_2(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4)) & \cos(\omega_2(\tau_2 + \tau_3 + \tau_4)) & \cos(\omega_2(\tau_3 + \tau_4)) & \cos(\omega_2 \tau_4) \end{pmatrix} = \\ & = \sum_{j=0}^1 \sin(\omega_{2-j} \tau_3) \sin(\omega_{1+j} \tau_1) - \sin(\omega_{2-j}(\tau_2 + \tau_3)) \sin(\omega_{1+j}(\tau_1 + \tau_2)) + \\ & + \sin(\omega_{2-j} \tau_2) \sin(\omega_{1+j}(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)) \neq 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Для управления с четырьмя переключениями ($K - 1 = 4$) условие невырожденности выглядит следующим образом

$$\det \begin{pmatrix} \cos(\omega_1 t_1) & \cos(\omega_1 t_2) & \cos(\omega_1 t_3) & \cos(\omega_1 t_4) \\ \sin(\omega_1 t_1) & \sin(\omega_1 t_2) & \sin(\omega_1 t_3) & \sin(\omega_1 t_4) \\ \cos(\omega_2 t_1) & \cos(\omega_2 t_2) & \cos(\omega_2 t_3) & \cos(\omega_2 t_4) \\ \sin(\omega_2 t_1) & \sin(\omega_2 t_2) & \sin(\omega_2 t_3) & \sin(\omega_2 t_4) \end{pmatrix} = 0, \quad (10)$$

левую часть которого можно записать в явном виде

$$\sum_{j=0}^1 \sin(\omega_{2-j}\tau_4) \sin(\omega_{1+j}\tau_2) - \sin(\omega_{2-j}(\tau_3 + \tau_4)) \sin(\omega_{1+j}(\tau_2 + \tau_3)) + \sin(\omega_{2-j}\tau_3) \sin(\omega_{1+j}(\tau_2 + \tau_3 + \tau_4)) = 0. \quad (11)$$

Из сравнения выражений (9) и (11), оказывается, что со сдвигом на единицу у индекса τ_i функциональные части этих выражений равны. Полученная связь условия невырожденности и достаточного условия непрерывности иллюстрируется в разделе моделирование.

Моделирование. Для классов трех и четырех переключений ищутся решения, удовлетворяющие необходимым условиям оптимальности, которые доставляют минимум критерию задачи (3), для некоторого множества конечных состояний первого осциллятора (2). Для второго осциллятора конечным состоянием является начало координат. Выбраны следующие параметры системы:

$$\varepsilon = 0.4, \omega_1 = 1, \omega_2 = 1.4.$$

Классу трех переключений с начальным управлением $\varepsilon, -\varepsilon$ соответственно отвечают голубая и красная области на рис. 2. Класс четырех переключений представлен оранжевой и зеленой областями с управлением на начальном интервале $-\varepsilon, \varepsilon$ соответственно.

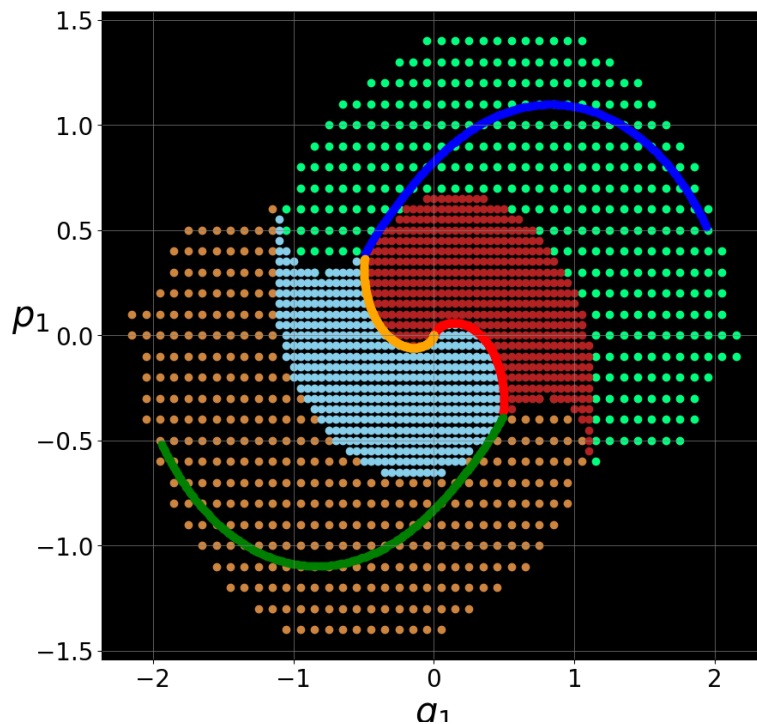


Рис. 2. Точки фазовой плоскости первого осциллятора

Обнуление внутреннего интервала управления в классе четырех переключений приводит к кривым (синяя и зеленая), соответствующим классу двух переключений при различных начальных управлениях. Обнуление крайнего интервала управления в классе трех переключений также приводит к классу двух переключений (оранжевая и красная кривые).

На рис. 3. красным цветом изображена поверхность, определяемая уравнением (11) для координат, индексы которых сдвинуты на единицу.

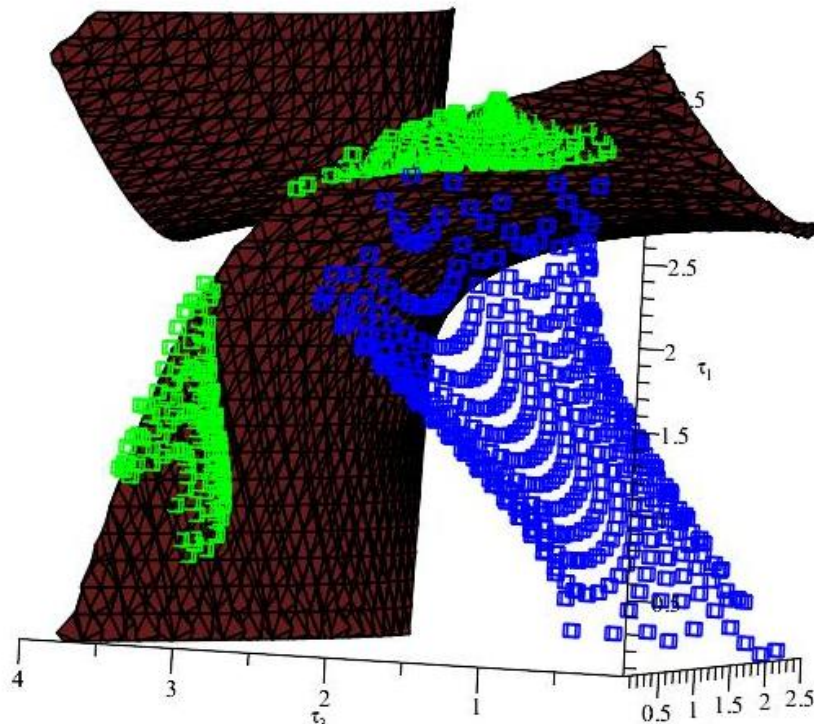


Рис. 3. Точки фазовой плоскости первого осциллятора

Зеленые точки соответствуют интервалам (τ_2, τ_3, τ_4) класса четырех переключений и лежат на красной поверхности, что соответствует выполнению условий невырожденности (11) для класса четырех переключений. Классу трех переключений отвечают синие точки, которые не попадают на поверхность, что означает непрерывность функции $T_0(\varepsilon)$ в окрестностях каждой из них.

Заключение. В работе представлены новые результаты для задачи быстрогодействия двух несинхронных осцилляторов. В зависимости от количества переключений управления найдены достаточные условия непрерывности критерия задачи, как функции от ограничения на управление. Показано, что функциональная часть условия непрерывности критерия задачи в классе трех переключений совпадает с условием невырожденности управления для четырех переключений управления. Полученные результаты иллюстрируются моделированием.

Библиографический список

1. Болтянский, В.Г. Математические методы оптимального управления / В.Г. Болтянский. – М.: Наука, 1969. – 408 с.
2. Черноусько, Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
3. Берлин, Л.М. Условия экстремума при ограниченном скалярном управлении двумя несинхронными осцилляторами в задаче быстрогодействия / Л.М. Берлин, А.А. Галяев // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. – 2022. – Т. 505, №4. – С. 86–91.
4. Берлин, Л.М. Об управляемости и достижимости двух несинхронных осцилляторов с ограниченным скалярным управлением / Л.М. Берлин, А.А. Галяев, П.В. Лысенко // Труды 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ «Радиотехника и компьютерные технологии». – 2021. – С. 54–56.
5. Зорич, В.А. Математический анализ / В.А. Зорич. – М.: МЦНМО, 2002. – 664 с.

АЛГЕБРА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ИНВАРИАНТОВ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

М.М. Вольных

В работе описана структура алгебры дифференциальных инвариантов уравнения, описывающего распространение тепла в одномерной неоднородной среде, относительно точечных преобразований. Неоднородность означает зависимость коэффициента теплопроводности от точек среды теплопроводности в неоднородных средах.

Ключевые слова: дифференциальные инварианты, джеты, допустимые преобразования.

Введение. В работе найдены дифференциальные инварианты класса линейных уравнений теплопроводности в неоднородных средах относительно точечных преобразований. Такие уравнения имеют вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(x) \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где t – время, x – пространственная координата, $u = u(t, x)$ – неизвестная функция (температура), а $k(x)$ – коэффициент теплопроводности. Точечные преобразования представляют собой преобразования переменных t, x, u .

Под допустимыми преобразованиями мы понимаем точечные преобразования, сохраняющие класс уравнений (1). Это означает, что при допустимых преобразованиях в уравнении может изменяться функция k , а сам вид уравнения остается прежним.

Следуя идеям Софуса Ли, мы будем искать инфинитезимальные допустимые преобразования, то есть преобразования, полученные в результате сдвига вдоль траекторий некоторых векторных полей.

Допустимые преобразования. Пусть $J^2(\mathbb{R}^2)$ – пространство 2-джетов функций двух переменных с каноническими координатами $t, x, u_{0,0}, u_{1,0}, u_{0,1}, u_{2,0}, u_{1,1}, u_{0,2}$ [1–2]. Уравнение (1) порождает гиперповерхность $\mathcal{E} = \{F = 0\}$ в этом пространстве. Здесь

$$F = u_{1,0} - k'(x)u_{0,1} - k(x)u_{0,2}. \quad (2)$$

Пусть X – векторное поле на пространстве 0-джетов и Φ_t – преобразование сдвига вдоль траекторий этого векторного поля от $t = 0$ до t , т.е. Φ_0 – тождественное преобразование. Пусть в результате преобразования Φ_s гиперповерхность \mathcal{E} переходит в гиперповерхность \mathcal{E}_s , т.е. $\Phi_s^{(2)}(\mathcal{E}) = \mathcal{E}_s$. В терминах функций это означает, что

$$\left(\Phi_s^{(2)}\right)^*(F) = \lambda_s F_s, \quad (3)$$

где $\Phi_s^{(2)}$ – продолжение преобразования Φ_s в пространство 2-джетов, λ_s – некоторая функция на пространстве 2-джетов, зависящая от параметра s , причем $\lambda_0 = 1$, а функция

$$F_s = u_{1,0} - k'_s(x)u_{0,1} - k_s(x)u_{0,2}$$

соответствует гиперповерхности \mathcal{E}_s , причем $F_0 = F$.

Дифференцируя обе части равенства (2) по параметру s при $s = 0$, получим:

$$\left.\frac{d}{ds}\right|_{s=0} \left(\Phi_s^{(2)}\right)^*(F) = \left.\frac{d\lambda_s}{ds}\right|_{s=0} F_0 - \left.\frac{dF_s}{ds}\right|_{s=0},$$

т.е.

$$\mathcal{L}_{X^{(2)}}(F) = \left.\frac{d\lambda_s}{ds}\right|_{s=0} F_0 - \left.\frac{dk'_s(x)}{ds}\right|_{s=0} u_{0,1} - \left.\frac{dk_s(x)}{ds}\right|_{s=0} u_{0,2}.$$

Здесь $X^{(2)}$ – продолжение векторного поля X в пространство $J^2(\mathbb{R}^2)$, а $\mathcal{L}_{X^{(2)}}$ – оператор производной Ли. Ограничивая последнее равенство на гиперповерхность \mathcal{E} , получаем:

$$X^{(2)}(F)|_{\mathcal{E}} = K'(x)u_{0,1} + K(x)u_{0,2}, \quad (4)$$

где

$$K(x) = \left.\frac{dk_s(x)}{ds}\right|_{s=0}.$$

Уравнение (4) представляет собой систему линейных уравнений в частных производных относительно коэффициентов векторного поля X , решая которую, находим вид этого векторного поля:

$$X = (a_1 t + a_0) \frac{\partial}{\partial t} + (b_1 t + b_0) \frac{\partial}{\partial x} + (c_1 u_{0,0} + c_0) \frac{\partial}{\partial u_{0,0}},$$

где $a_0, a_1, b_0, b_1, c_0, c_1$ – произвольные постоянные.

Таким образом, алгебра Ли допустимых преобразований уравнений (1) порождена векторными полями

$$Y_1 = \frac{\partial}{\partial t}, Y_2 = \frac{\partial}{\partial x}, Y_3 = \frac{\partial}{\partial u_{0,0}},$$

$$Y_4 = t \frac{\partial}{\partial t}, Y_5 = x \frac{\partial}{\partial x}, Y_6 = u_{0,0} \frac{\partial}{\partial u_{0,0}}$$

Соответствующая ей группа Ли состоит из трансляций и растяжений по координатам $t, x, u_{0,0}$.

Действие допустимых преобразований на функцию $k(x)$. Выясним как данные преобразования изменяют функцию $k(x)$. Вычисляя потоки, порождаемые допустимыми векторными полями Y_1, \dots, Y_6 , находим:

$$\left(\Phi_s^{(2)}\right)^*(F) = u_{1,0} - k'(x)u_{0,1} - k(x)u_{0,2};$$

$$\begin{aligned}
(\Phi_s^{(2)})^*(F) &= u_{1,0} - k'(x+s)u_{0,1} - k(x+s)u_{0,2}; \\
(\Phi_s^{(2)})^*(F) &= u_{1,0} - k'(x)u_{0,1} - k(x)u_{0,2}; \\
(\Phi_s^{(2)})^*(F) &= e^{-s}u_{1,0} - k'(x)u_{0,1} - k(x)u_{0,2}; \\
(\Phi_s^{(2)})^*(F) &= u_{1,0} - e^{-s}k'(xe^s)u_{0,1} - e^{-2s}k(xe^s)u_{0,2}; \\
(\Phi_s^{(2)})^*(F) &= e^s u_{1,0} - k'(x)u_{0,1}e^s - k(x)u_{0,2}e^s.
\end{aligned}$$

Видим, что преобразования, отвечающие векторным полям Y_1, Y_3, Y_6 , не меняют вида уравнения (1) и, следовательно, не меняют функцию $k(x)$. Преобразование, отвечающее векторному полю Y_2 , меняет аргумент x на $x + s$, а преобразование, отвечающее векторному полю Y_5 , умножает его на e^s .

Преобразование, отвечающее векторному полю Y_4 , умножает функцию $k(x)$ на e^s .

Преобразование Φ_5 умножает аргумент x на e^s . Таким образом, нетривиально на функцию $k(x)$ действуют только преобразования, отвечающие векторным полям Y_2, Y_4, Y_5 .

Дифференциальные инварианты допустимых преобразований. Пусть $J^q(\mathbb{R})$ – пространство q -джетов функций одной переменной с каноническими координатами x, k_0, \dots, k_q . Допустимые векторные поля Y_2, Y_4, Y_5 порождают векторные поля

$$Z_1 = \frac{\partial}{\partial x}, \quad Z_2 = x \frac{\partial}{\partial x}, \quad Z_3 = k_0 \frac{\partial}{\partial k_0}$$

на пространстве $J^0(\mathbb{R})$. Далее будем искать дифференциальные инварианты соответствующей группы Ли.

Напомним, что функция I на пространстве q -джетов называется *дифференциальным инвариантом* порядка $\leq q$ группы Ли G , если она не меняется под действием преобразований продолженной группы Ли $G^{(q)}$, т.е. $(g^{(q)})^*(I) = I$ для любого элемента $g \in G$. Пусть \mathcal{G} – алгебра Ли группы Ли G и $\mathcal{G}^{(q)}$ – продолженная алгебра Ли. Функция I на пространстве q -джетов является дифференциальным инвариантом порядка $\leq q$ группы Ли G тогда и только тогда, когда

$$Z^{(k)}(I) = 0 \tag{5}$$

для любого векторного поля $Z \in \mathcal{G}$.

Множество всех дифференциальных инвариантов порядка $\leq q$ образуют алгебру относительно операций сложения и умножения. Действительно, если I_1, I_2 – дифференциальные инварианты, то

$$Z^{(k)}(I_1 + I_2) = Z^{(k)}(I_1) + Z^{(k)}(I_2) = 0$$

и

$$Z^{(k)}(I_1 I_2) = Z^{(k)}(I_1)I_2 + I_1 Z^{(k)}(I_2) = 0.$$

Формулу (5) мы используем для вычисления дифференциальных инвариантов уравнения (1).

Пусть функция $I = I(x, k_0)$ является дифференциальным инвариантом. Тогда должны выполняться равенства $Z_1(I) = Z_2(I) = Z_3(I) = 0$. Поэтому $I = \text{const}$, т.е. не существует дифференциальных инвариантов нулевого порядка.

Пусть теперь $I = I(x, k_0, k_1)$ – дифференциальный инвариант первого порядка. Продолжения векторных полей Z_1, Z_2, Z_3 имеют вид

$$Z_1^{(1)} = \frac{\partial}{\partial x}, Z_2^{(1)} = x \frac{\partial}{\partial x} - k_1 \frac{\partial}{\partial k_1}, Z_3^{(1)} = k_0 \frac{\partial}{\partial k_0} + k_1 \frac{\partial}{\partial k_1}.$$

Поэтому дифференциальных инвариантов первого порядка также не существует.

Первый дифференциальный инвариант имеет второй порядок. Действительно, продолжения векторных полей в пространство 2-джетов имеют вид

$$Z_1^{(2)} = Z_1, Z_2^{(2)} = Z_2^{(1)} - 2k_2 \frac{\partial}{\partial k_2}, Z_3^{(2)} = Z_3^{(1)} + k_2 \frac{\partial}{\partial k_2}.$$

Решая систему уравнений (5) для $q = 2$, получаем:

$$I = I_2 = \frac{k_2 k_0}{k_1^2}.$$

Заметим, что решением системы (5) является также любая функция от этого инварианта. Это не случайно: любая (дифференцируемая) функция от инварианта также является инвариантом, т.к.

$$Z(h(I)) = h'(I)Z(I) = 0.$$

Теорема. Алгебра дифференциальных инвариантов порядка $\leq q$ уравнения (1) порождена инвариантами

$$J_p = \frac{k_p k_0^{p-1}}{k_1^p},$$

где $p = 2, \dots, q$.

Уравнения с постоянным дифференциальным инвариантом I_2 . Найдем вид уравнений (1), для которых $I_2 = 1$. Для этого нужно решить уравнение

$$\frac{k''k}{(k')^2} = 1.$$

Интегрируя это уравнение, получаем

$$k(x) = be^{ax}.$$

Поэтому уравнение (1) примет вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} - abe^{ax} \frac{\partial u}{\partial x} - be^{ax} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0,$$

здесь a, b – произвольные постоянные.

Заключение. В результате работы была получена алгебра дифференциальных инвариантов уравнения теплопроводности в неоднородных средах. Сформулирована теорема, позволяющая найти дифференциальные инварианты любого порядка.

Алгебра дифференциальных инвариантов нелинейного уравнения в частных производных третьего порядка была построена в работе [3]. Дифференциальные инварианты гамильтоновых уравнений с управляющим параметром были построены в работе [4], где также была доказана теорема о симплектической эквивалентности таких уравнений.

Библиографический список

1. Ehresmann, C. Introduction a la Theorie des Structures Infinitesimales et des Pseudo-groupes de Lie / C. Ehresmann // Coll. Geom. Differ. – Strasbourg: C.N.R.S. – 1953. – P. 97–110.
2. Krasilshchik, I.S. Geometry of jet spaces and nonlinear partial differential equations / I.S. Krasilshchik, V.V. Lychagin, A.M. Vinogradov // Gordon and Breach Science Publishers. – New York. – 1986. – P. 441.
3. Kushner, A.G. Differential invariants of third order evolutionary non-linear PDEs / A.G. Kushner, E.N. Kushner, A.V. Samohin // Twelfth International Conference Management of large-scale system development (MLSD-2019). – IEEE Piscataway. – 2019. – P. 1–3.
4. Кушнер, А.Г. Инварианты Петрова гамильтоновых систем с управляющим параметром / А.Г. Кушнер, В.В. Лычагин // Автоматика и телемеханика. – 2013. – №3. – С. 83–102.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ УГЛАМИ ЭЙЛЕРА КВАДРОКОПТЕРА НА ОСНОВЕ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛИ С НЕЙРОСЕТЕВОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

А.И. Глущенко, К.А. Ласточкин

Целью данного исследования является разработка адаптивной системы управления углами Эйлера квадрокоптера на основе эталонной модели. В отличие от известных работ, в данной статье для контуров управления креном, тангажом и рысканием получено аналитическое выражение для параметрической неопределенности объекта. Оно представляет собой линейную регрессию с нелинейными элементами как в векторе регрессора, так и в матрице параметров. Проанализировав такое уравнение, для компенсации неопределенности решено применить нейронную сеть, а также произведен математически обоснованный выбор набора ее входов. Выведены адаптивные законы настройки параметров сети и показана асимптотическая сходимости ошибки слежения. В качестве объекта рассматривается модель квадрокоптера Parrot Mambo. Предложенная система управления уменьшила сумму квадратов отклонений значений углов Эйлера от задания по сравнению с базовым регулятором $k^x x + k^r r$.

Ключевые слова: адаптивное управление с эталонной моделью, управление углами Эйлера, квадрокоптер, нейронная сеть, параметрическая неопределенность.

Введение. В последние годы квадрокоптеры нашли широкое применение для решения различных задач в гражданском секторе [1], таких как инспекция линий электропередач, сельское хозяйство, картография (в т.ч. внутри помещений) и т.д. Основная причина заключается в том, что они обладают рядом преимуществ, которые включают в себя, помимо прочего, простоту конструкции, компактность, малый вес и высокую маневренность. Однако при этом квадрокоптер является объектом с дефицитом каналов управления. Поэтому задача управления им для решения проблем стабилизации или отслеживания траектории является достаточно сложной.

Система управления квадрокоптером обычно состоит из регулятора высоты, внешнего контура с регуляторами пространственных координат и внутреннего контура управления углами Эйлера, включающего регуляторы рысканья, тангажа и крена. Задача управление углами Эйлера является базовой для реализации отслеживания траектории и стабилизации объекта

[2]. Таким образом, эффективность управления во внутренних контурах во многом определяет качество выполнения требований полетного задания [3].

Регуляторы крена, тангажа и рысканья должны функционировать в условиях наличия немоделируемой динамики и неопределенности параметров объекта [2]. Поэтому, помимо ПИД-законов управления [4, 5], для управления ориентацией коптера в пространстве были применены различные методы. В частности, это линеаризация обратной связью [6], управление на основе скользящих режимов [7], интегральный бекстеппинг [8] и H_∞ -управление [9].

Основным условием применимости большинства вышеперечисленных методов является знание значений параметров объекта, таких как моменты инерции по осям x , y и z , коэффициент сопротивления воздуха, коэффициент тяги винта и многие другие. Очевидно, что все эти параметры являются нестационарными в процессе полета. Поэтому одним из эффективных способов управления квадрокоптером в условиях параметрической неопределенности является применение адаптивных методов управления. Одним из наиболее распространенных подходов является фреймворк адаптивного управления на основе эталонной модели (MRAC). Одна из реализаций MRAC для управления углами Эйлера предложена в [10]. Но модель квадрокоптера рассматривается только для малых значений углов Эйлера с целью проведения ее линеаризации, что накладывает ограничения на применение такого решения.

Если рассматривать более широкий диапазон углов Эйлера, то это означает необходимость компенсации нелинейной неопределенности параметров, изменяющихся во времени. Решить такую задачу возможно путем применения универсальных аппроксиматоров, в частности, нейронных сетей (НС) [11, 12]. В [11, 12] в явном виде не представлено уравнение для параметрической неопределенности, которая компенсируется с помощью НС (ее выход добавляется к выходу базовых регуляторов крена, тангажа и рысканья). Поэтому нет и обоснования того, каким образом была выбрана структура входного вектора НС. В [12] настраиваются параметры только выходного слоя НС. Поэтому скрытый слой должен содержать большее количество нейронов, чтобы сохранить аппроксимационные свойства. Также в [12] выход НС добавляется к выходу ПИД-регуляторов тангажа, крена и рысканья, а не к базовому закону $k^x x + k^r r$.

Таким образом, вклад данной работы состоит в следующем: в1) для задачи управления углами Эйлера получено аналитическое выражение для параметрической неопределенности для модели квадрокоптера без общепринятых упрощений; в2) используя (в1), обосновывается как применение НС для компенсации неопределенности, так и выбранная структура входного слоя НС; в3) реализована классическая схема MRAC

(базовый регулятора – $k^x x + k^r r$), в которой настраиваются параметры всех слоев НС.

Постановка задачи. Математическая модель квадрокоптера записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} 1) \dot{\bar{p}} = \bar{V} = R V^b, \quad 2) \dot{\xi} = \omega = J \omega^b, \\ 3) \dot{V}^b = \frac{1}{m} F_{ext} - \omega^b \times V^b, \quad 4) I_b \dot{\omega}^b = \tau_{ext} - \omega^b \times I_b \omega^b, \end{aligned} \quad (1)$$

где \times – это векторное произведение, m – масса квадрокоптера, ψ, θ и ϕ – углы крена, тангажа и рыскания. Центр масс квадрокоптера совпадает с началом координат неинерциальной системы отсчета (НСО). Любой вектор $\bar{p}^b = (x, y, z)$ в такой системе преобразуется в $\bar{p} = (X, Y, Z)$ в инерциальной системе отсчета (ИСО) с помощью матрицы R (см. уравнение (2.1) в [12]).

$\bar{V} = [\dot{X} \ \dot{Y} \ \dot{Z}]^T$ и $w = [\dot{\psi} \ \dot{\theta} \ \dot{\phi}]^T$ – линейные и угловые скорости квадрокоптера в ИСО. $V^b = [u, v, w]^T$ и $\omega^b = [p, q, r]^T$ – те же векторы, но в НСО. $\xi = [\psi, \theta, \phi]^T$ – вектор углов Эйлера. $F_{ext} = [f_x, f_y, f_z]^T$ и $\tau_{ext} = [\tau_\psi, \tau_\theta, \tau_\phi]^T$ – это внешние силы и моменты в НСО. $\tau_\psi, \tau_\theta, \tau_\phi$ – это выходы регуляторов крена, тангажа и рыскания соответственно. f_z включает выход регулятора высоты T . ω^b преобразуется в ω , используя J :

$$J = \begin{bmatrix} 1 & s_\psi t_\theta & c_\psi t_\theta \\ 0 & c_\psi & -s_\psi \\ 0 & s_\psi / c_\theta & c_\psi / c_\theta \end{bmatrix}, \begin{cases} t_{(\cdot)} = \tan(\cdot) \\ c_{(\cdot)} = \cos(\cdot) \\ s_{(\cdot)} = \sin(\cdot) \end{cases} \quad (2)$$

Допущение 1. Квадрокоптер симметричен относительно плоскостей $xB-zB$ и $yB-zB$ НСО. Поэтому матрица инерций является диагональной $I_b = \text{diag}(J_x, J_y, J_z)$, где J_x, J_y, J_z – это моменты инерции вдоль осей xB, yB и zB НСО соответственно.

В соответствии с [2, 13], учитывая силу сопротивления воздуха, четвертое уравнение из (1) переписано в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{J_y - J_z}{J_x} qr \\ \frac{J_z - J_x}{J_y} pr \\ \frac{J_x - J_y}{J_z} pq \end{bmatrix}}_{W_j} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{J_r}{J_x} q \omega_r - \frac{k_\psi l}{J_x} \dot{\psi} - \frac{K_c s_\psi}{J_x} \\ \frac{J_r}{J_y} p \omega_r - \frac{k_\theta l}{J_y} \dot{\theta} - \frac{K_c s_\theta}{J_y} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\Delta_{pq}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\tau_\psi}{J_x} \\ \frac{\tau_\theta}{J_y} \\ \frac{\tau_\phi}{J_z} \end{bmatrix}}_{\Gamma_b^{-1} \tau_{ext}}, \quad (3)$$

где K_c – аэродинамический коэффициент, k_ψ, k_θ – коэффициенты сопротивления воздуха, l – расстояние от центра масс каждого из двигателей до центра масс квадрокоптера, J_r – момент инерции каждого из двигателей, ω_r – суммарная скорость вращения всех двигателей.

Упомянутые выше выходы регуляторов $\tau_\psi, \tau_\theta, \tau_\phi, T$ преобразуются в силу тяги для каждого из двигателей T_i ($i=1,2,3,4$) (см. (13) в [6]).

Проблема управления углами Эйлера. Выдвигаются следующие допущения. Текущие параметры квадрокоптера полагаются неизвестными. $\psi, \theta, \phi, p, q, r$ измеримы. Используя $[p, q, r]$, вычисляются значения $[\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\phi}]$ (см. (1), уравнение 2). Также полагается, что регуляторы высоты и пространственных координат X и Y в ИСО (его выходы – это задания ψ_{ref}, θ_{ref} для контуров управления креном и тангажом) уже были синтезированы на основе номинальной модели объекта. Далее в (1) рассматриваются уравнения 2 и 4.

Цель. Разработка адаптивной системы управления углами Эйлера квадрокоптера, т.е. синтез регуляторов рысканья, крена и тангажа, способных компенсировать параметрическую неопределенность объекта (см. (3)) и обеспечить асимптотическую сходимость ошибки слежения за траекторией к компактному множеству.

Основной результат. Параметризация неопределенности. Рассмотрим следующий вектор состояний: $x_p = [\psi, \dot{\psi}, \theta, \dot{\theta}, \phi, \dot{\phi}]$. Необходимо переписать второе и четвертое уравнения (1) в форме пространства координат состояния. Для этого, во-первых, продифференцируем обе части второго уравнения из (1). Затем подставим в полученный результат уравнение (3):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} &= JI_b^{-1}\tau_{ext} + JW_J + J\Delta_{pqr} + \dot{J}\omega^b = \bar{J}\bar{I}_b^{-1}\tau_{ext} + (JI_b^{-1} - \bar{J}\bar{I}_b^{-1})\tau_{ext} + JW_J + J\Delta_{pqr} + \dot{J}\omega^b = (4) \\ &= \bar{J}\bar{I}_b^{-1} \left(\tau_{ext} + (\bar{J}\bar{I}_b^{-1})^{-1} \Theta \bar{\omega}(\tau_{ext}, x_p) \right) = \bar{J}\bar{I}_b^{-1} (\tau_{ext} + \Delta), \\ &\Delta = (\bar{J}\bar{I}_b^{-1})^{-1} \Theta \bar{\omega}(\tau_{ext}, x_p), \\ \Theta &= \begin{bmatrix} \frac{\bar{J}_x - J_x}{J_x \bar{J}_x} & \frac{s_\psi t_\theta (\bar{J}_y - J_y)}{J_y \bar{J}_y} & \frac{c_\psi t_\theta (\bar{J}_z - J_z)}{J_z \bar{J}_z} & \frac{J_y - J_z}{J_x} & \frac{J_x - J_y}{J_y} s_\psi t_\theta & \frac{J_x - J_y}{J_z} c_\psi t_\theta & -\frac{J}{J_x} & 0 & -\frac{K_x}{J_x} & 0 & -\frac{k_\psi l}{J_x} & 0 & 0 & c_\psi t_\theta + \frac{s_\psi}{c_\theta^2} & -s_\psi t_\theta + \frac{c_\psi}{c_\theta^2} \\ 0 & \frac{c_\psi (\bar{J}_y - J_y)}{J_y \bar{J}_y} & -\frac{s_\psi (\bar{J}_z - J_z)}{J_z \bar{J}_z} & 0 & \frac{J_x - J_z}{J_y} c_\psi & -\frac{J_x - J_z}{J_z} s_\psi & 0 & \frac{J}{J_y} & 0 & -\frac{K_y}{J_y} & 0 & -\frac{k_\phi l}{J_y} & 0 & -s_\psi & -c_\psi \\ 0 & \frac{s_\psi (\bar{J}_y - J_y)}{J_y \bar{J}_y c_\theta} & \frac{c_\psi (\bar{J}_z - J_z)}{J_z \bar{J}_z c_\theta} & 0 & \frac{J_x - J_z}{J_y} \frac{s_\psi}{c_\theta} & \frac{J_x - J_z}{J_z} \frac{c_\psi}{c_\theta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_\psi c_\theta - s_\psi s_\theta}{c_\theta^2} & \frac{-s_\psi c_\theta - c_\psi s_\theta}{c_\theta^2} \end{bmatrix}, \\ \bar{\omega} &= [\tau_\psi \quad \tau_\theta \quad \tau_\phi \quad qr \quad pr \quad pq \quad q\omega_r \quad p\omega_r \quad s_\psi \quad s_\theta \quad \dot{\psi} \quad \dot{\theta} \quad p \quad q \quad r]^T \end{aligned}$$

где \bar{I}_b – это номинальная матрица I_b .

Неопределенность $\Delta = [\Delta_\psi \quad \Delta_\theta \quad \Delta_\phi]^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ параметризована как линейная регрессия с параметрами Θ и измеримым регрессором $\bar{\omega}$, все компоненты которого могут быть получены из τ_{ext} и x_p . Перепишем (4) как:

$$\dot{x}_p = A_p x_p + B_p J^T (\tau_{ext} + \Delta), \quad \tau_{ext} = (J^T)^{-1} u_{base} - u_{ad},$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{J_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c_{\psi}}{J_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c_{\psi}}{c\theta J_y} \end{bmatrix}, A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, x_p = \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Необходимо компенсировать нелинейную и нестационарную неопределенность Δ , поэтому применим для этих целей нейронную сеть.

Адаптивная система с эталонной моделью и нейросетевым компенсатором. Определим эталонную модель в следующем виде:

$$\dot{x}_{ref} = A_{ref} x_{ref} + B_{ref} r(t), \quad B_{ref} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \omega_n^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_n^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_n^2 \end{bmatrix}, A_{ref} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_0 & a_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_0 & a_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Структура x_{ref} совпадает с x_p , $r = [\psi_d \quad \theta_d \quad \phi_d]^T$, $a_0 = -\omega_n^2$, $a_1 = -2\gamma\omega_n$, $\gamma > 0$, $\omega_n > 0$.

Используя универсальную аппроксимационную теорему [14], представим неопределенность в форме НС с одним скрытым слоем:

$$\dot{x}_p = A_p x_p + B_p J^T (\tau_{ext} + W^T \sigma(V^T x_m) + \varepsilon), \quad \|\varepsilon\| \leq \varepsilon_N, \quad \bar{\Delta} = W^T \sigma(V^T x_m), \quad x_m = [b^1 \quad \tau_{ext} \quad x_p \quad \omega_r]^T,$$

$$\sigma(V^T x_m) = [b^2 \quad \sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \dots \quad \sigma_{N2}]^T, \quad V = \begin{bmatrix} \theta_{N1}^1 & \dots & \theta_{N2}^1 \\ w_{N1,1}^1 & \dots & w_{N1,N2}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{N1}^N & \dots & \theta_{N2}^N \\ w_{N1,1}^N & \dots & w_{N1,N2}^N \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} \theta_{N3}^1 & \dots & \theta_{N3}^N \\ w_{N2,1}^1 & \dots & w_{N2,N3}^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \theta_{N3}^N & \dots & \theta_{N3}^N \\ w_{N2,1}^N & \dots & w_{N2,N3}^N \end{bmatrix}. \quad (7)$$

На основе (4) входной слой НС включает τ_{exp} , x_p . ε – это ошибка аппроксимации, ε_N – это ее известная верхняя оценка ($\|\varepsilon\| \leq \varepsilon_N$), W и V – неизвестные идеальные параметры, σ – это сигмоидальная функция активации.

Нейросетевую оценку неопределенности $\bar{\Delta}$ представим в виде:

$$\hat{\Delta} = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x_m), \quad (8)$$

где \hat{V} , \hat{W} – текущие значения весов НС, вычисленные с помощью алгоритма настройки, который будет определен далее. Определим ошибки аппроксимации и оценок параметров НС следующим образом:

$$e = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x_m) - W^T \sigma(V^T x_m) - \varepsilon, \quad \tilde{V} = \hat{V} - V, \quad \tilde{W} = \hat{W} - W \quad (9)$$

Для получения законов настройки для \hat{V} , \hat{W} необходимо, чтобы ошибка аппроксимации линейно зависела от ошибок по настраиваемым параметрам. Но V входит в (9) нелинейно. Поэтому разложим σ в ряд Тейлора:

$$\sigma(V^T x_m) = \sigma(\hat{V}^T x_m) - \dot{\sigma}(\hat{V}^T x_m) \tilde{V}^T x_m + O(\tilde{V}^T x_m)^2, \quad \dot{\sigma}(\hat{x}_m) = \left. \frac{d\sigma(x_m)}{dx_m} \right|_{x_m = \hat{x}_m} \quad (10)$$

Уравнение в отклонениях для $e_{ref} = x_p - x_{ref}$ запишем в виде:

$$\dot{e}_{ref} = A_{ref} e_{ref} + B_p J^T (-u_{ad} + W^T \sigma(V^T x_m) + \varepsilon) + B_p (u_{base} + B_p^T (A_p - A_{ref}) x_p - B_p^T B_{ref} r), \quad (11)$$

Составляющие закона управления определим следующим образом:

$$u_{base} = -B_p^T (A_p - A_{ref}) x_p + B_p^T B_{ref} r, \quad u_{ad} = W^T \sigma(V^T x_m), \quad k^x = -B_p^T (A_p - A_{ref}), \quad k^r = B_p^T B_{ref}. \quad (12)$$

Закон управления с настраиваемыми параметрами определим как:

$$\hat{u}_{ad} = \hat{W}^T \sigma(\hat{V}^T x_m). \quad (13)$$

Используя (9), выражения (13) и (10) подставим в (11), чтобы получить:

$$\dot{e}_{ref} = A_{ref} e_{ref} + B_p J^T \delta - B_p J^T \tilde{W}^T (\sigma(\hat{V}^T x_m) - \dot{\sigma}(\hat{V}^T x_m) \hat{V}^T x_m) - B_p J^T \hat{W}^T \dot{\sigma}(\hat{V}^T x_m) \tilde{V}^T x_m, \quad (14)$$

где $\delta = W^T O(\tilde{V}^T x_m)^2 + \varepsilon$.

Теорема. Пусть законы настройки \hat{V} , \hat{W} параметров НС имеют вид:

$$\dot{\hat{V}} = \Gamma_v \left[x_m e_{ref}^T P B_p J^T \hat{W}^T \dot{\sigma}(\hat{V}^T x_m) - \sigma_v \hat{V} \right], \quad (15)$$

$$\dot{\hat{W}} = \Gamma_w \left[\left(\left[\sigma(\hat{V}^T x_m) - \dot{\sigma}(\hat{V}^T x_m) \right] \hat{V}^T x_m \right) \cdot e_{ref}^T P B_p J^T - \sigma_w \hat{W} \right],$$

Тогда расширенная ошибка $\zeta = \begin{bmatrix} e_{ref}^T & \text{vec}^T(\tilde{W}) & \text{vec}^T(\tilde{V}) \end{bmatrix}^T$ равномерно предельно ограничена ($\zeta \in UUB$) с предельной границей R , и ошибка слежения e_{ref} асимптотически сходится к компактному множеству с границей R_1 .

Доказательство. Выберем кандидата в функции Ляпунова в виде:

$$L(e_{ref}, \tilde{V}, \tilde{W}) = e_{ref}^T P e_{ref} + \text{trace}(\tilde{V}^T \Gamma_v^{-1} \tilde{V}) + \text{trace}(\tilde{W}^T \Gamma_w^{-1} \tilde{W}), \quad (16)$$

$$A_{ref}^T P + P A_{ref} = -Q, \quad \lambda_m \|\zeta\|^2 \leq V(\|\zeta\|) \leq \lambda_M \|\zeta\|^2,$$

$$\lambda_m = \min \{ \lambda_{\min}(P), \lambda_{\min}(\Gamma_w^{-1}), \lambda_{\min}(\Gamma_v^{-1}) \}, \quad \lambda_M = \max \{ \lambda_{\max}(P), \lambda_{\max}(\Gamma_w^{-1}), \lambda_{\max}(\Gamma_v^{-1}) \}$$

Ее производную запишем в виде:

$$\begin{aligned} \dot{L} = & -e_{ref}^T Q e_{ref} + 2 \text{trace} \left(\tilde{W}^T \left[-(\sigma(\hat{V}^T x_m) - \dot{\sigma}(\hat{V}^T x_m) \hat{V}^T x_m) e_{ref}^T P B_p J^T + \Gamma_w^{-1} \dot{\tilde{W}} \right] \right) + \\ & + 2 \text{trace} \left(\tilde{V}^T \left[-x_m e_{ref}^T P B_p J^T \hat{W}^T \dot{\sigma}(\hat{V}^T x_m) + \Gamma_v^{-1} \dot{\tilde{V}} \right] \right) + 2 e_{ref}^T P B_p J^T \delta \end{aligned} \quad (17)$$

Подставим (15) в (17):

$$\begin{aligned} \dot{L} \leq & -\lambda_{\min} Q \|e_{ref}\|^2 + 2\lambda_{\max}(P) \|B_p J_m^T\| \|e_{ref}\| \delta_0 - 2 \|B_p J_m^T\| \sigma_v \|\tilde{V}\|^2 + 2 \|B_p J_m^T\| \sigma_v \|\tilde{V}\| V_0 - \\ & - 2 \|B_p J_m^T\| \sigma_w \|\tilde{W}\|^2 + 2 \|B_p J_m^T\| \sigma_w \|\tilde{W}\| W_0, \quad \delta_0 = \max \|\delta\|_{\infty}, \quad V_0 = \|V\|, \quad W_0 = \|W\|. \end{aligned} \quad (18)$$

J ограничена для всех допустимых для квадрокоптера значений углов Эйлера, а J_m является ее верхней границей. Первые два члена правой части (18) дополним до полного квадрата. Тогда верхняя граница \dot{L} :

$$\begin{aligned} \dot{L} \leq & -\frac{1}{2}(\lambda_{\min}(Q)\|e_{ref}\|^2 + 2\underbrace{\|B_p J_m^T\| \sigma_v}_{\gamma_1} \|\tilde{V}\|^2 + 2\|B_p J_m^T\| \sigma_w \|\tilde{W}\|^2) + \\ & + \underbrace{\frac{2\lambda_{\max}^2(P)\|B_p J_m^T\|^2 \varrho_0^2}{\lambda_{\min}(Q)} + \|B_p J_m^T\| \sigma_v V_0^2 + \|B_p J_m^T\| \sigma_w W_0^2}_{\gamma_2} \leq \kappa L + \gamma_2, \quad \kappa = \frac{1}{2\lambda_M} \min\{\lambda_{\min}(Q), \gamma_1\} \end{aligned} \quad (19)$$

Решим неравенство, применив лемму о сравнении:

$$\|\zeta(t)\| \leq \sqrt{\frac{\lambda_M}{\lambda_m}} e^{-\kappa t} \|\zeta(0)\| + \frac{\gamma_2}{\kappa \lambda_m} = R. \quad (20)$$

Поэтому $\zeta(t)$ равномерно предельно ограничена. Для доказательства асимптотической сходимости ошибки слежения e_{ref} используем (20) и учтем определение γ_2 и $t \rightarrow \infty$. В результате получаем:

$$\|e_{ref}\| \leq \sqrt{\frac{2\lambda_{\max}(P)}{\lambda_{\min}(Q)\lambda_{\min}(P)}} \gamma_2 = R_1, \quad (21)$$

что завершает доказательство теоремы.

Численные эксперименты. В качестве объекта управления была выбрана модель миникоптера Parrot Mambo. Ее параметры приведены в [14]. В качестве базовой использовалась система управления из проекта «parrotMinidroneHover» (Matlab). Блок ее регуляторов углов Эйлера был заменен на предлагаемый в данной работе.

Желаемая траектория полета включала в себя: 1) взлет до высоты 1.1 м, 2) отслеживание траектории $X = \cos(2\pi t)$ и $Y = \sin(4\pi t)$ с 20й по 90ю секунды. Значения параметров адаптивной системы были выбраны следующим образом: $\omega_n = 15$, $\gamma = 1.1$, $N_1 = 10$, $N_2 = 50$, $N_3 = 3$, $\hat{W}(0) = 0_{N_2 \times N_3}$, $\hat{V}(0) = 0_{N_1 \times N_2}$, $\sigma_v = \sigma_w = 0.001$, $\Gamma_w = \text{diag}(8, 6, 3) \cdot 10^{-7}$, $\Gamma_v = 10^{-8} I_{15 \times 15}$, $k^x = I_{3 \times 3} \otimes [-225 \quad -33]$, $k^r = \text{diag}(225, 225, 225)$. Матрица P является решением уравнения Ляпунова (см. (16)) при $Q = I_{6 \times 6}$. Матрица \bar{I}_b выбрана как $\text{diag}(10^{-5}, 10^{-5}, 5 \cdot 10^{-4})$. Идеальные значения $I_b = \text{diag}(5.8 \cdot 10^{-5}, 7.17 \cdot 10^{-5}, 10^{-4})$, также как и все остальные параметры квадрокоптера, считались неизвестными.

Было проведено два эксперимента: 1) τ_{ext} включало u_{base} и u_{ad} , 2) τ_{ext} включало только u_{base} . На рис.1а приведены графики переходных процессов по ψ и θ для обоих случаев. График для ϕ не приведен, так как задание по рысканию всегда было нулевым. При использовании НС удалось существенно снизить колебания. Это привело к более плавному движению квадрокоптера. Сумма квадратов ошибок (sse) между заданным значением и углами Эйлера была на 33,13% ниже для системы с НС по сравнению с системой, основанной только на регуляторе $k^x x + k^r r$. Также был проведен эксперимент с системой управления углами Эйлера на основе ПИД-регуляторов из проекта "parrotMinidroneHover". По

сравнению с ними предложенная система управления снизила значение sse в два раза.

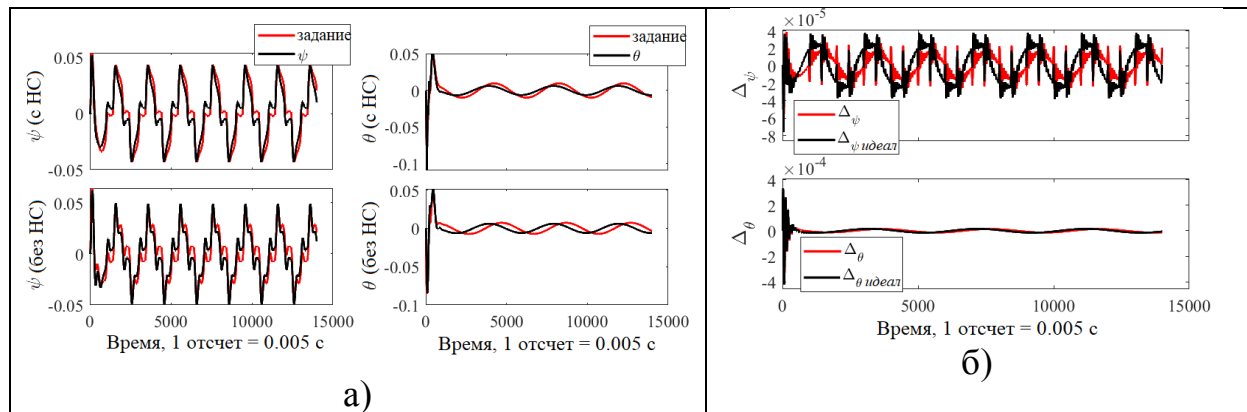


Рис. 1. (а) переходные процессы по ψ и θ для систем управления с и без НС, (б) идеальные значения неопределенности и ее НС оценка

Идеальное значение неопределенности было вычислено по (4). На рис. 1б приведены результаты сравнения таких идеальных сигналов с выходами НС, подтверждающие теоретические результаты.

Заключение. Получено аналитическое выражение для параметрической неопределенности объекта. Результатом его анализа является выбор НС для компенсации такой неопределенности и состава ее входных сигналов. Получены законы настройки параметров сети, которые обеспечили предельную равномерную ограниченность расширенной ошибки слежения.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ (МД-1787.2022.4).

Библиографический список

1. Emran, B.J. A review of quadrotor: An underactuated mechanical system / B.J. Emran, N. Homayoun // *Annual Reviews in Control*. – 2018. – Vol. 46. – P. 165–180.
2. Lian, S. Adaptive attitude control of a quadrotor using fast nonsingular terminal sliding mode / S. Lian et al. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2021. – Vol. 69, No. 2. – P. 1597–1607.
3. Mihailescu-Stoica, D. High performance adaptive attitude control of a quadrotor / R. Acuna, and J. Adamy // *In Proceedings of European Control Conference (ECC)*. – Naples: IFAC, 2019. – P. 3462–3469.
4. Bolandt, H. Attitude Control of a Quadrotor with Optimized PID Controller / H. Bolandt et al. // *Intelligent Control and Automation*. – 2013 – Vol. 4, No. 3. – P. 335–342.
5. Junior, J.C.V. Stability Control of a Quad-Rotor Using a PID Controller / J.C.V. Junior et al. // *Brazilian Journal of Applied Instrumentation and Control*. – 2012. – Vol. 1, No. 1. – P. 15–20.

6. Altug, E. Control of a quadrotor helicopter using dual camera visual feedback / E. Altug et al. // *International Journal of Robotics Research*. – 2005. – Vol. 24. – P. 329–341.
7. Xu, R. Sliding mode control of a quadrotor helicopter / R. Xu, U. Ozguner // *In Proceedings of Conference on Decision and Control*. – San Diego: IEEE, 2006. – P. 4957–4962.
8. Jia, Z. Integral backstepping sliding mode control for quadrotor helicopter under external uncertain disturbances / Z. Jia et al. // *Aerospace Science and Technology*. – 2017. – Vol. 68. – P. 299–307.
9. Noormohammadi-Asl, A. System identification and H_∞ -based control of quadrotor attitude / A. Noormohammadi-Asl et al. // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2020. – Vol. 135. – P.1–16.
10. Dydek, Z.T. Adaptive control of quadrotor UAVs: a design trade study with flight evaluations / Z.T. Dydek, A.M. Annaswamy, E. Lavretsky // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – 2013. – Vol. 21, No. 4. – P. 1400–1406.
11. Joshi, G. Design and flight evaluation of deep model reference adaptive controller / G. Joshi, J. Viridi, G. Chowdhary // *In Proceedings of AIAA Scitech 2020 Forum*. – Orlando: AIAA, 2020. – P.1–17.
12. Viridi, J. Flight evaluation of deep model reference adaptive control: M.S. thesis / J. Viridi. – Illinois, 2020. – 68 p.
13. Razmi, H. Neural network-based adaptive sliding mode control design for position and attitude control of a quadrotor UAV / H. Razmi, S. Afshinfar // *Aerospace Science and technology*. – 2019. – Vol. 91. – P. 12–27.
14. Gorban, A.N. The general approximation theorem / A.N. Gorban, D.C. Wunsch // *In Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks*. – Anchorage: IEEE, 1998. – P.1271–1274.

ПРОЦЕДУРА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

А.И. Глущенко, К.А. Ласточкин

Исследование посвящено задаче определения переключений параметров линейных систем. Предложена процедура, позволяющая при неизвестных параметрах системы и конечном возбуждении регрессора восстанавливать по измеримым координатам состояния и управлению моменты времени переключений параметров системы с произвольной наперед заданной точностью. Свойства процедуры доказаны аналитически и продемонстрированы в численном эксперименте.

Ключевые слова: системы с переключением, линейная регрессия, кусочно-постоянные параметры, конечное возбуждение, идентификация.

Введение. Динамика реальных объектов управления обычно описывается сложными нелинейными дифференциальными уравнениями, получаемыми законами механики, электродинамики, гидродинамики и т.д. В целях синтеза эффективных и в то же время простых алгоритмов управления подобными системами исходную нелинейную модель часто линеаризуют в окрестности заданных рабочих точек [1]. Такой прием позволяет с достаточной точностью описать во всем фазовом пространстве исходную нелинейную систему гибридной моделью, состоящей из набора линейных моделей с постоянными параметрами и дискретной функции переключений между ними [2]. На практике параметры линейных моделей, как и функция переключений, могут быть неизвестны или известны с недостаточной точностью. В свою очередь, переключения параметров могут вызываться не только эволюцией траекторий нелинейной системы в фазовом пространстве, но и неизвестными дискретными событиями (отказом исполнительных механизмов, повреждением составных частей системы, включением/выключением бинарных компонентов системы). В этой связи для синтеза эффективного управления гибридной системой имеет смысл использовать методы теории адаптивного беспойскового управления [3].

Общая формулировка задачи адаптивного управления гибридными системами (линейными системами с дискретным переключением параметров) включает в себя [4]: 1) определение моментов времени переключений; 2) идентификацию дискретной функции переключений, 3) оценку текущих значений неизвестных параметров каждой линейной модели.

В современной литературе предложены различные алгоритмы решения сформулированной комплексной задачи управления в различных допущениях. В [3, 5] предложены системы адаптивного управления, работоспособные при известных моментах времени переключений параметров и известной функции переключений. В [6], напротив, предложен алгоритм восстановления моментов времени переключений и функции переключения при известных параметрах каждой модели. В [7, 8] предложены алгоритмы восстановления моментов времени переключений параметров и функции переключения при неизвестных параметрах каждой модели.

Однако, как показывает литературный обзор, на сегодняшний день не предложено адаптивной системы, одновременно решающей все три выделенные задачи идентификации, а комплексная задача адаптивного управления гибридными системами все еще ожидает своего решения.

Настоящая работа посвящена совершенствованию методов определения моментов времени переключений неизвестных параметров гибридной системы. Существующие решения [6–8] требуют либо нетривиальных алгоритмических оффлайн процедур обработки измеримых с системы сигналов [7, 8], либо – знания параметров активной на настоящий момент модели [6]. В данной работе предлагается новый алгоритм определения моментов времени переключения параметров линейных систем, который:

- не использует оффлайн процедур обработки измеримых сигналов;
- не требует знания параметров гибридной системы.

С помощью процедуры динамического расширения и смешивания регрессора предлагается из измеримых с объекта сигналов в онлайн режиме формировать функцию-индикатор изменения параметров, который равен нулю всюду кроме интервала задержки детекции. Далее на основе вычисленного индикатора предлагается алгоритм детектирования, позволяющий с регулируемой произвольной точностью восстанавливать моменты времени переключений неизвестных параметров системы.

Предложенный алгоритм может быть использован в составе как известных методов адаптивно управления гибридными системами, так и в составе вновь проектируемых алгоритмов.

Определение 1. Регрессор $\varphi(t) \in R^n$ конечно возбужден ($\varphi(t) \in FE$) на интервале времени $[t_r^+; t_e]$ если существуют $t_e \geq t_r^+ \geq 0$ и $\alpha > 0$ такие, что:

$$\int_{t_r^+}^{t_e} \varphi(\tau) \varphi^T(\tau) d\tau \geq \alpha I_{n \times n}, \quad (1)$$

где α – уровень возбуждения регрессора.

Постановка задачи. Рассмотрим линейные системы с дискретным переключением параметров:

$$\forall t \geq t_0^+, \dot{x}(t) = \Theta_{\kappa(t)}^T \Phi(t) = A_{\kappa(t)} x(t) + B_{\kappa(t)} u(t), x(t_0^+) = x_0, \quad (2)$$

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} x^T(t) & u^T(t) \end{bmatrix}^T, \Theta_{\kappa(t)}^T = \begin{bmatrix} A_{\kappa(t)} & B_{\kappa(t)} \end{bmatrix},$$

где $x(t) \in R^n$ – координаты состояния с неизвестными начальными условиями x_0 , $u(t) \in R^m$ – управляющие воздействия, $A_{\kappa(t)} \in R^{n \times n}$ – неизвестная матрица состояний, $B_{\kappa(t)} \in R^{n \times m}$ – неизвестная матрица усилений управлений, $\kappa(t) \in \Xi = \{1, 2, \dots, N\}$ – неизвестная дискретная функция, определяющая моменты времени изменения параметров объекта, t_0^+ – известный начальный момент времени, N – количество значений, которые могут принимать параметры $\Theta_{\kappa(t)}$. Пара $(A_{\kappa(t)} B_{\kappa(t)})$ управляема, $\forall t > t_0^+$ вектор $\Phi(t) \in R^{n+m}$ измерим, а матрица $\Theta_{\kappa(t)} \in R^{(n+m) \times n}$ неизвестна.

В общем случае сигналом $\kappa(t)$ кодируется последовательность переключений:

$$\Sigma = \left\{ (j_0, t_0^+), (j_1, t_1^+), \dots, (j_{i-1}, t_{i-1}^+), (j_i, t_i^+), \dots \mid j_i \in \Xi, j_i \neq j_{i+1}, i \in \mathbb{N} \right\}, \quad (3)$$

которая определяет, что $\forall t \in [t_i^+; t_{i+1}^+)$, $\kappa(t) = j_i$, $\Theta_{\kappa(t)} = \Theta_{j_i}$ (на i -ом интервале времени параметр $\Theta_{\kappa(t)}$ принимает j -ое значение из множества Ξ).

Допущение 1. Пусть $\exists \bar{\Delta}_0 > 0, T_{\min} > \min_{\forall i \in \mathbb{N}} T_i > 0$ такие, что $\forall i \in \mathbb{N}$ одновременно:

$$1) \text{ верны неравенства } t_{i+1}^+ - t_i^+ \geq T_{\min}, \|\theta_i - \theta_{i-1}\| = \|\Delta_i^0\| \leq \bar{\Delta}_0.$$

2) регрессор $\Phi(t)$ возбуждается конечно ($\Phi(t) \in \text{FE}$) на интервале $[t_i^+; t_i^+ + T_i]$ со степенью α_i .

3) регрессор $\Phi(t)$ возбуждается конечно ($\Phi(t) \in \text{FE}$) на интервале $[\hat{t}_i^+; \hat{t}_i^+ + T_i]$ со степенью $\bar{\alpha}_i$, где $\alpha_i > \bar{\alpha}_i > 0, \hat{t}_i^+ \in [t_i^+; t_i^+ + T_i]$.

При выполнении Допущения требуется построить алгоритм формирования оценок \hat{t}_i^+ момента времени переключений t_i^+ , гарантирующий выполнение следующего неравенства:

$$\forall i \in \mathbb{N} \tilde{t}_i^+ = \hat{t}_i^+ - t_i^+ \leq T_i. \quad (4)$$

Основной результат. Чтобы построить алгоритм восстановления t_i^+ , на основании вектора измеримых сигналов $\Phi(t)$ сначала получим измеримую функцию индикатор изменения параметров системы (2). Определим функцию-индикатор следующим образом.

Определение 2. Функция $f(t) \in \mathbb{R}$ является индикатором изменений параметров линейной системы (2) если для $f(t)$ верны определения:

$$\forall t \in [\hat{t}_i^+; \hat{t}_i^+) f(t) \neq 0, \forall t \in [\hat{t}_i^+; \hat{t}_{i+1}^+) f(t) = 0. \quad (5)$$

Пользуясь определением (5), опишем алгоритм составления из $\Phi(t)$ функции индикатора изменений параметров системы (2).

Утверждение 1. На основании состояний фильтра

$$\dot{\bar{\Phi}}(t) = -l\bar{\Phi}(t) + \Phi(t), \bar{\Phi}(\hat{t}_i^+) = 0_{m+n}. \quad (6)$$

нормализованных сигналов:

$$\bar{\varphi}_n(t) = n_s(t)\bar{\varphi}(t), \bar{\varphi}(t) = \left[\bar{\Phi}^T(t) \quad e^{-l(t-\hat{t}_i^+)} \right]^T, n_s(t) = \frac{1}{1+\bar{\varphi}^T(t)\bar{\varphi}(t)}, \quad (7)$$

$$\bar{z}_n(t) = n_s(t)[x(t) - l\bar{x}(t)], \bar{x}(t) = \begin{bmatrix} I_{n \times n} & 0_{n \times m} \end{bmatrix} \bar{\Phi}(t),$$

и состояний дополнительных фильтров

$$\dot{z}(t) = e^{-\sigma(t-\hat{t}_i^+)} \bar{\varphi}_n(t) \bar{z}_n^T(t), z(\hat{t}_i^+) = 0_{(n+m+1) \times n}, \quad (8)$$

$$\dot{\varphi}(t) = e^{-\sigma(t-\hat{t}_i^+)} \bar{\varphi}_n(t) \bar{\varphi}_n^T(t), \varphi(\hat{t}_i^+) = 0_{(n+m+1) \times (n+m+1)},$$

функция-индикатор изменения параметров системы (2) может быть вычислена следующим образом:

$$\epsilon(t) = \Delta(t) \bar{\varphi}_n(t) \bar{z}_n^T(t) - \bar{\varphi}_n(t) \bar{\varphi}_n^T(t) Y(t) \quad (9)$$

$$Y(t) := \text{adj}\{\varphi(t)\} z(t), \Delta(t) := \det\{\varphi(t)\} I_{(n+m+1) \times (n+m+1)},$$

где $l > 0, \sigma > 0$.

Доказательство. Введем в рассмотрение ошибку $\chi(t) = x(t) - l\bar{x}(t)$.

Дифференцируя $\chi(t)$ по времени, получим

$$\dot{\chi}(t) = \dot{x}(t) - l\dot{\bar{x}}(t) = \Theta_{\kappa(t)}^T \Phi(t) + l^2 \bar{x}(t) - lx(t) = -l\chi(t) + \Theta_{\kappa(t)}^T \Phi(t) \quad (10)$$

Тогда функция $\bar{z}_n(t)$ примет вид

$$\bar{z}_n(t) = n_s(t) \left(e^{-l(t-\hat{t}_i^+)} x(\hat{t}_i^+) + \int_{\hat{t}_i^+}^t e^{-l(t-\tau)} \Theta_{\kappa(\tau)}^T \Phi(\tau) d\tau \right) \quad (11)$$

На интервале $[\hat{t}_i^+; \hat{t}_{i+1}^+)$ в силу $\forall t \in [\hat{t}_i^+; \hat{t}_{i+1}^+), \kappa(t) = j_i, \Theta_{\kappa(t)} = \Theta_{j_i}$ получим

$$\bar{z}_n(t) = n_s(t) \left(e^{-l(t-\hat{t}_i^+)} x(\hat{t}_i^+) + \Theta_{j_i}^T \int_{\hat{t}_i^+}^t e^{-l(t-\tau)} \Phi(\tau) d\tau \right) = \Theta_{j_i}^T \bar{\varphi}_n(t), \quad (12)$$

$$Y(t) = \text{adj}\{\varphi(t)\} z(t) = \text{adj}\{\varphi(t)\} \int_{\hat{t}_i^+}^t e^{-\sigma(t-\tau)} \bar{\varphi}_n(\tau) \bar{\varphi}_n^T(\tau) \Theta_{j_i} d\tau = \Delta(t) \Theta_{j_i}.$$

Теперь рассмотрим интервал $[\hat{t}_i^+; \hat{t}_i^+)$, где аналогично получим

$$\begin{aligned}
\bar{z}_n(t) &= n_s(t) \left(e^{-l(t-\hat{t}_{i-1}^+)} x(\hat{t}_{i-1}^+) + \Theta_{j_{i-1}}^T \int_{\hat{t}_{i-1}^+}^{t_i^+} e^{-l(t-\tau)} \Phi(\tau) d\tau + \Theta_{j_i}^T \int_{t_i^+}^t e^{-l(t-\tau)} \Phi(\tau) d\tau \right) \pm \\
&\pm n_s(t) \left(\Theta_{j_i}^T \int_{\hat{t}_{i-1}^+}^{t_i^+} e^{-l(t-\tau)} \Phi(\tau) d\tau \right) = \Theta_{j_i}^T \bar{\varphi}_n(t) + n_s(t) (\Theta_{j_{i-1}}^T - \Theta_{j_i}^T) \int_{\hat{t}_{i-1}^+}^{t_i^+} e^{-l(t-\tau)} \Phi(\tau) d\tau \\
Y(t) &= adj\{\varphi(t)\} z(t) = adj\{\varphi(t)\} \left(\int_{\hat{t}_{i-1}^+}^{t_i^+} e^{-\sigma(t-\tau)} \bar{\varphi}_n(t) \bar{\varphi}_n^T(t) \Theta_{j_{i-1}} d\tau + \right. \\
&\left. + \int_{t_i^+}^t e^{-\sigma(t-\tau)} \bar{\varphi}_n(t) \bar{\varphi}_n^T(t) \Theta_{j_i} d\tau \pm \int_{\hat{t}_{i-1}^+}^{t_i^+} e^{-\sigma(t-\tau)} \bar{\varphi}_n(t) \bar{\varphi}_n^T(t) \Theta_{j_i} d\tau \right) = \\
&= \Delta(t) \Theta_{j_i} + adj\{\varphi(t)\} \int_{\hat{t}_{i-1}^+}^{t_i^+} e^{-\sigma(t-\tau)} \bar{\varphi}_n(t) \bar{\varphi}_n^T(t) d\tau (\Theta_{j_{i-1}} - \Theta_{j_i}).
\end{aligned} \tag{13}$$

Подставив (12) и (13) в (9), имеем следующее интервальное определение:

$$\epsilon(t) = \begin{cases} 0, \forall t \in [\hat{t}_i^+; t_{i+1}^+) \\ n_s(t) \Delta(t) \int_{\hat{t}_{i-1}^+}^{t_i^+} e^{-l(t-\tau)} \Phi^T(\tau) d\tau (\Theta_{j_{i-1}} - \Theta_{j_i}) + \bar{\varphi}_n(t) \bar{\varphi}_n^T(t) adj\{\varphi(t)\} \times \\ \times \int_{\hat{t}_{i-1}^+}^{t_i^+} e^{-\sigma(t-\tau)} \bar{\varphi}_n(t) \bar{\varphi}_n^T(t) d\tau (\Theta_{j_{i-1}} - \Theta_{j_i}), \forall t \in [t_i^+; \hat{t}_i^+) \end{cases} \tag{14}$$

Откуда следует удовлетворение функции $\epsilon(t)$ требованиям Определения 2, что и требовалось доказать.

На основании индикатора (9) переключений параметров системы (2) введем алгоритм детектирования:

$$\begin{aligned}
&\text{initialize: } i \leftarrow 1, t_{up} = \hat{t}_{i-1}^+ \\
&\text{IF } t - t_{up} \geq \Delta_{pr} \text{ AND } \|\epsilon(t)\| > 0 \text{ THEN } \hat{t}_i^+ := t + \Delta_{pr}, t_{up} \leftarrow t, i \leftarrow i + 1, \\
&\text{который при } 0 \leq \Delta_{pr} < \min_{\forall i \in \mathbb{N}} T_i \text{ гарантирует достижение цели (4).}
\end{aligned} \tag{15}$$

Утверждение 2. Пусть $\Phi(t) \in FE$, выполнено Допущение 1, \hat{t}_i^+ формируется в соответствии с алгоритмом (15), тогда $\hat{t}_i^+ \geq t_i^+$, а ситуационным выбором Δ_{pr} гарантируется выполнение условия $\tilde{t}_i^+ = \Delta_{pr} \leq T_i$.

Доказательство Утверждения приведено в [9].

Таким образом, процедура определения переключений параметров линейных систем состоит из процедуры вычисления по измеримым

сигналам функции (9) и алгоритма детектирования переключений (15). На рис. 1 представлена блок схема предложенного подхода.

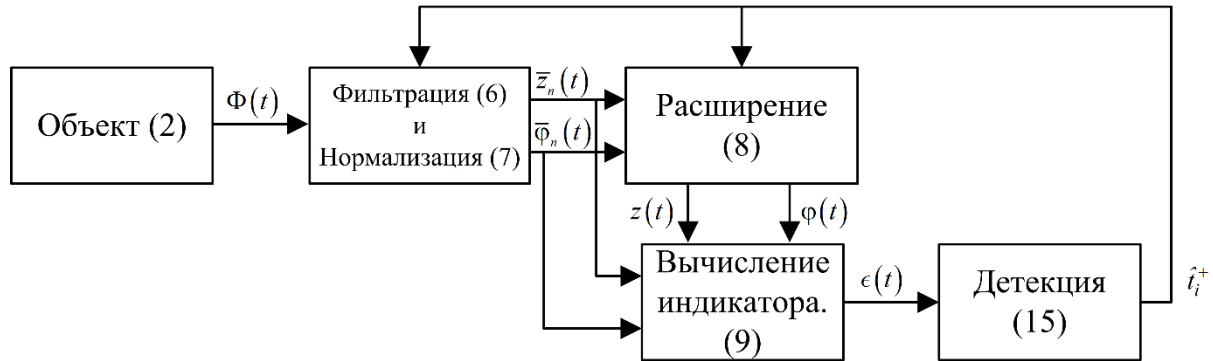


Рис. 1. Блок схема системы определения переключений параметров линейных систем

Численный эксперимент. В численном эксперименте рассмотрим систему второго порядка с двумя наборами параметров:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -6 & -8 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -4 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \end{bmatrix}, x_0 = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где последовательность переключений между матрицами (16) определим следующим образом:

$$\Sigma = \{(1, 0), (2, 5), (1, 10)\}. \quad (17)$$

а сигнал управления выберем в соответствии с выражением:

$$u(t) = [-5 \quad -4]x(t) + 8r(t). \quad (18)$$

Параметры фильтров (6), (8) и алгоритма (15), а также величину задания $r(t)$ установим следующим образом:

$$r(t) = 1, l = 10, \sigma = 5, \Delta_{pr} = 0,1. \quad (19)$$

На рис. 2 представлены переходные процессы по индикатору $\|\epsilon(t)\|$, а на рис. 3 – по \hat{t}_i^+ при различных Δ_{pr} .

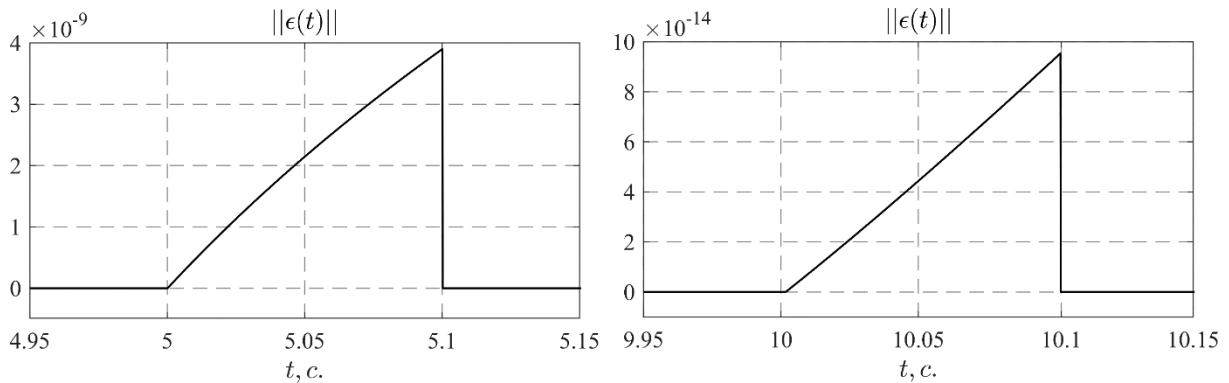


Рис. 2. Переходные процессы по $\epsilon(t)$

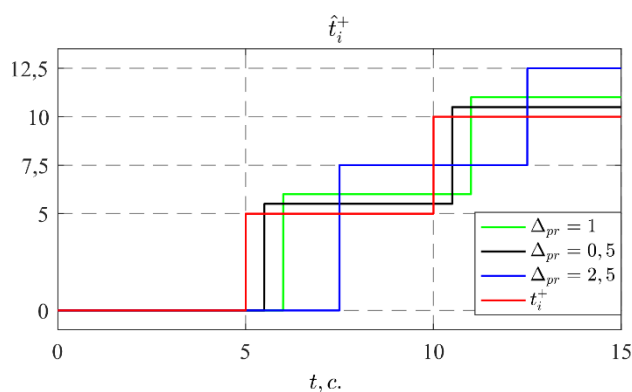


Рис. 3. Значения \hat{t}_i^+ при различных Δ_{pr}

Результаты проведенного эксперимента подтверждают выводы, сделанные в Утверждениях 1 и 2, а также демонстрируют работоспособность и эффективность предлагаемого решения.

Заключение. В работе предлагается новый алгоритм определения моментов времени переключений параметров линейных систем. В отличие от известных решений, разработанный подход не требует знания параметров объекта и не использует оффлайн процедур сбора, хранения и обработки измеримых с объекта сигналов. Задержка детекции алгоритма регулируется выбором варьируемого параметра.

В дальнейшем разработанный алгоритм может быть использован в задачах идентификации и адаптивного управления линейными системами с переключением параметров.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ (МД-1787.2022.4).

Библиографический список

1. Бесекерский, В.А. Теория автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 752 с.
2. Liberzon, D. Switching in systems and control / D. Liberzon. – Boston: Birkhauser, 2003. – 233 p.
3. Sang, Q. Adaptive control of piecewise linear systems: the state tracking case / Q. Sang, G. Tao // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2011. – Vol. 57, No. 2. – P. 522–528.
4. Kersting, S. Adaptive Identification and Control of Uncertain Systems with Switching : PhD thesis; Technische Universitat Munchen / S. Kersting. – Munchen, 2018. – 224 p.
5. Sang, Q. Adaptive control of piecewise linear systems with applications to NASA GTM / Q. Sang, G. Tao // Proceedings of the 2011 American Control Conference. – San Francisco: IFAC, 2011. – P. 1157–1162.

6. Kersting, S. An alternative approach to switching hyperplane estimation in PWA systems / S. Kersting, M. Buss // Proceedings of 2015 American Control Conference (ACC). – Chicago: IFAC, 2015. – P. 4449–4454.
7. Du, Y. Online Identification of Piecewise Affine Systems Using Integral Concurrent Learning / Y. Du, F. Liu, J. Qiu, M. Buss // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. – 2021. – Vol. 68, No. 10. – P. 4324-4336.
8. Du, Y. A novel recursive approach for online identification of continuous-time switched nonlinear systems / Y. Du, F. Liu, J. Qiu, M. Buss // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2021. – Vol. 31, No. 15. – P. 1–20.
9. Glushchenko, A. Unknown piecewise constant parameters identification with exponential rate of convergence / A. Glushchenko, K. Lastochkin // International Journal of Adaptive Control and Signal Process. – 2022. – Vol.36. – P. 1-32.

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ «ОБУЧЕНИЯ» СЕТОЧНОЙ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЯХ

П. И. Жуков, А.И. Глущенко, А.В. Фомин

В работе производится сравнение эффективности решения смежной вариационной задачи нестационарной теплопроводности с различными целевыми функциями: Хьюбера и квадрата невязок. Для них были протестированы различные оптимизаторы, среди которых ADAGRAD, ADADELTA и экспериментально полученный линейный оптимизатор. Было установлено, что при решении смежной вариационной задачи с использованием технологических данных, полученных из действующих АСУ ТП, функция Хьюбера показывает более устойчивую сходимость при применении рассмотренных оптимизаторов, но не улучшает скорость сходимости.

Ключевые слова: обучение, ADAGRAD, ADADELTA, сеточная модель, нестационарная теплопроводность.

Введение. С ростом цифровизации технологических процессов особенно актуальной становится проблема применения накопленных данных для оптимизации параметров их течения [1]. Металлургическая отрасль в данном вопросе не является исключением [2], так как содержит большое количество энергоемких технологических объектов, для которых задачи повышения энергоэффективности остаются крайне важными.

Одним из примеров такого энергоемкого технологического объекта можно считать проходные пламенные печи. Такие многозонные нагревательные агрегаты, служащие для нагрева стальных заготовок перед прокатом, являются одними из основных потребителей энергоресурсов предприятия наряду с электроприводами.

У подобного рода объектов имеется ряд особенностей, которые не позволяют рассматривать классическое управление (на базе отдельных контуров на основе ПИД-регуляторов) одновременно как оптимальное и энергоэффективное. Данный факт связан, в-первую очередь, с наличием множества внутривидных параметров, которые влияют друг на друга в процессе работы печи, и о которых отдельные контура не имеют данных [3].

Современным способом решить данную проблему является применение концепций, связанных с построением обобщающих систем над классическими контурами (АРС [4]). В контексте многозонных печей нагрева теория построения такой надсистемы рассмотрена в работе [5].

В основе подобных надсистем управления предполагается наличие одной или нескольких математических моделей физических процессов нагрева, от которых возможно будет оттолкнуться при выработке энергоэффективных значений заданий для локальных контуров.

Примером такой модели может служить математическая модель нагрева заготовок, которая позволяет рассчитать температуру поверхности металла, зная входные параметры (время пребывания в зонах печи и температуру атмосферы в них, а также ряд других технологических параметров).

Построение такой модели возможно на основе уравнения нестационарной теплопроводности, так как процесс нагрева, с точки зрения отдельной заготовки, является крайне нестационарным. Непостоянство параметров нагрева возникает за счет того, что заготовка движется через рабочее пространство печи, проходя при этом различные температурные зоны с непостоянной скоростью, при этом отдельные технологические параметры (например, давление в печи) также изменяются неравномерно.

Ключевым недостатком решения на основе нестационарной теплопроводности при моделировании высокотемпературного нагрева стали является необходимость адаптации модели к нагреваемому веществу, которая выражается в идентификации временных зависимостей основных теплофизических параметров вещества. Адаптация теплофизических параметров стали осложняется большим количеством физико-химических конфигураций, называемых «марками» стали, для каждой из которых временные зависимости искомых параметров различны.

В данной работе рассматривается одно из решений данной проблемы, основанное на решении смежной вариационной задачи нестационарной теплопроводности на основе данных с действующих АСУ ТП. Производится сравнение целевой функции Хьюбера и классического квадрата невязки для решения данной задачи, а также приводится сравнение различных оптимизаторов в этом контексте.

Проблема адаптации модели нестационарной теплопроводности. В общем виде уравнение нестационарной теплопроводности, в прямоугольных координатах имеет вид (1):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (1)$$

Здесь T – температура поля, °С; λ – коэффициент теплопроводности материала, из которого выполнена заготовка, Вт/(м*°С), ρ – плотность материала заготовки, кг/м³; c – коэффициент теплоемкости материала заготовки, Дж/(кг*°С); x и y соответственно описывают двумерное пространство, в котором моделируется температурное поле.

Построение модели на основе (1) возможно при помощи метода конечных разностей, применение которого к данной задаче было рассмотрено в работе [6] и более детально представлено в работе [7]. Основной проблемой полученного конечно-разностного решения является необходимость адаптировать модель к нагреваемому веществу, что в общем смысле сводится к нахождению оптимальных правых частей уравнений (2):

$$\lambda = f_\lambda(T); c = f_c(T); \rho = f_\rho(T). \quad (2)$$

Проблема адаптации при моделировании нестационарной теплопроводности является актуальной, так как нет единых теоретических формул, позволяющих вывести оптимальные правые части уравнений (2). Эта проблема уже поднималась в [8, 9] и часто предлагаемым решением является использование аппарата регрессионного анализа в совокупности с дискретными замерами искомых теплофизических параметров, представленными в специальных справочниках («марочниках» стали).

Однако, у данного подхода имеется несколько недостатков: во-первых, не для всех «марок» стали имеется необходимое количество дискретных замеров, чтобы по ним можно было восстановить регрессионное уравнение; во-вторых, использование двух различных «марочников» дает, хоть и незначительно, но разные коэффициенты уравнения при одинаковом виде регрессии, что можно заметить из работ [7] и [8]. Последний недостаток косвенно свидетельствует о наличии внутренней ошибки в данных, оценить количественно которую не представляется возможным, а, следовательно, и нет возможности оценить и скорректировать ошибку основной модели.

В качестве альтернативы адаптации к нагреваемому веществу через регрессии предлагается подход на основе решения смежной вариационной задачи, суть которой в следующем: пусть имеет место замена вида (3)

$$\varphi^{(n)} = \lambda; \omega^{(n)} = \rho \cdot c, \quad (3)$$

где n – это шаг по временной сетке с размерностью N , которая имеет вид (4)

$$w_\tau = \{n = \tau \cdot k_l \mid k_l = \overline{0, N}, \tau \cdot N = t_{\max}\}. \quad (4)$$

Коэффициенты φ и ω покрывают всю временную сетку, что при наличии двух пространственных координат позволяет рассматривать их как векторы следующего вида:

$$\varphi_l = \{\varphi_l^{(n)} \mid n = \overline{0, N}\}; \omega_l = \{\omega_l^{(n)} \mid n = \overline{0, N}\}, \quad (5)$$

где l – это нормаль к поверхности двумерного сечения, принимающее значение x или y в зависимости от рассматриваемого вектора движения температурного поля внутри заготовки.

В [10] ставится смежная вариационная задача по нахождению условно

оптимальных значений векторов (5) при помощи стохастического градиентного спуска [11] (η – это параметр скорости обучения):

$$\Delta\varphi_l^{(n)} = -\eta \cdot \frac{\partial E_l^{(n)}}{\partial \varphi_l^{(n)}}; \Delta\omega_l^{(n)} = -\eta \cdot \frac{\partial E_l^{(n)}}{\partial \omega_l^{(n)}}. \quad (6)$$

В качестве целевой функции для нахождения частной производной ошибки по ω и φ в работе [10] рассматривался квадрат невязки

$$E_l^{(n)} = 0.5 \sum_{i=1}^M (T_i - f_l(\omega_l^{(n)}, \varphi_l^{(n)}, T_l^{(n)}))_i^2, \quad (7)$$

где T_i – это i -е эталонное значение температуры, $T_l^{(n)}$ – это значение температурного поля в n -м узле временной сетки, функция $f_l(\omega_l^{(n)}, \varphi_l^{(n)}, T_l^{(n)})$ для x и y выводится через граничные условия и, по сути, описывает температуры на границах пространственных сеток Ox и Oy соответственно.

В рамках данной работы предлагается рассмотреть кусочно-заданную функцию потерь Хьюбера [12], имеющую вид (8)

$$E_l^{(n)} = \sum_{i=1}^M \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot (T_i - f_l(\omega_l^{(n)}, \varphi_l^{(n)}, T_l^{(n)}))_i^2, e_i < d \\ d \cdot |T_i - f_l(\omega_l^{(n)}, \varphi_l^{(n)}, T_l^{(n)}))_i| - \frac{1}{2} \cdot d, e_i \geq d \end{cases} \quad (8)$$

где $e_i = |(T_i - f_l(\omega_l^{(n)}, \varphi_l^{(n)}, T_l^{(n)}))_i|$, d – это граничный параметр, разделяющий пространство ошибки на линейное для больших ее значений и квадратичное – для малых. Предполагается, что функция Хьюбера обеспечит большую устойчивость к выбросам в исходных обучающих данных, а линейная часть при большой ошибке позволит обеспечить более быструю сходимость.

Производная квадратичной части ошибки (8) известна из работы [10]. Рассмотрим частную производную по φ для линейной части (8), предполагая, что для ω она идентична:

$$\left. \frac{\partial E_l^{(n)}}{\partial \varphi_l} \right|_{e \geq d} = -d \cdot \text{sgn}(T - f_l(\omega_l^{(n)}, \varphi_l^{(n)}, T_l^{(n)})) \cdot \frac{\partial f_l(\omega_l^{(n)}, \varphi_l^{(n)}, T_l^{(n)})}{\partial \varphi_l}, \quad (9)$$

где сигнум в общем виде может быть определен как следующая функция:

$$\text{sgn}(y - f(x)) = \begin{cases} 0, & (y - f(x)) = 0 \\ \frac{(y - f(x))}{|y - f(x)|}, & (y - f(x)) \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом, частная производная ошибки (8) по φ_l имеет вид

$$\frac{dE_l^{(n)}}{d\varphi_l} = \begin{cases} \frac{\partial f_l(\omega_l^{(n)}, \varphi_l^{(n)}, T_l^{(n)})}{\partial \varphi_l} \cdot (y - f_l(\omega_l^{(n)}, \varphi_l^{(n)}, T_l^{(n)})), e_i < d \\ -d \cdot \text{sgn}(y - f_l(\omega_l^{(n)}, \varphi_l^{(n)}, T_l^{(n)})) \cdot \frac{\partial f_l(\omega_l^{(n)}, \varphi_l^{(n)}, T_l^{(n)})}{\partial \varphi_l}, e_i \geq d \end{cases} \quad (11)$$

Частная производная по ω_l будет иметь идентичный вид. Было проведено сравнение двух моделей, одна из которых выполняет коррекцию параметров (6), опираясь на целевую функцию квадратов невязок, а вторая – на целевую функцию Хьюбера (8).

Численный эксперимент. Целью численного эксперимента было определить скорость сходимости решения обратной вариационной задачи для двух целевых функций: квадрата невязки и функции Хьюбера (8). В качестве исходных данных использовались сведения из действующей АСУ ТП печи нагрева, которые описывали отдельно взятые заготовки (история нагрева). Сведения включали информацию о времени, проведенной каждой заготовкой в конкретной паре зон печи, температуры в этих зонах. Данные с пирометра по температуре поверхности заготовки выступили эталонными выходными значениями, так как реализуется «обучение с учителем».

Размер исходной выборки – 6000 записей, которые были разбиты на тестовое (20%) и обучающее (80%) множества. Обучающее подмножество подавалось в модель порциями по 100 значений с повторениями, записи отбирались случайно. В качестве критерия оценки качества модели предполагается использовать абсолютную среднюю ошибку:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^M |e_i|}{M}, \quad (12)$$

где M – это совокупное число наблюдений в одной порции (100 значений).

Предварительные тесты модели в работе [10] показали, что процесс обучения на полных данных без адаптивного шага обучения занимает слишком большое время, чтобы обеспечить стабильный множественный эксперимент. Для решения данной проблемы было решено рассмотреть несколько моделей адаптивной коррекции параметров, таких как ADADELTA [13] и ADAGRAD [14].

Модель адаптивного шага ADADELTA наиболее детально представлена в работе [14] и является расширением модели ADAGRAD. В основе метода лежит накопление экспоненциально убывающей средней квадратов градиентов

$$E[(\delta^2)]_{(n)} = \bar{\rho} \cdot E[\delta^2]_{(n-1)} + (1 - \bar{\rho})\delta_{(n)}^2, \quad (13)$$

где $\bar{\rho}$ – это параметр силы затухания градиента, δ – частная производная ошибки по корректируемому параметру, n – номер временного узла, на котором происходит коррекция.

Коррекция же самих параметров для данной модели происходит по измененным формулам вида (14), а именно:

$$\Delta\varphi_l^{(n)} = -\frac{\text{RMS}[\Delta\varphi_l]_{(n-1)}}{\text{RMS}[\delta_l]_{(n)}} \cdot \frac{\partial E^{(n)}}{\partial \varphi_l^{(n)}}; \Delta\omega_l^{(n)} = -\frac{\text{RMS}[\Delta\omega_l]_{(n-1)}}{\text{RMS}[\delta_l]_{(n)}} \cdot \frac{\partial E^{(n)}}{\partial \omega_l^{(n)}} \quad (14)$$

Здесь $\text{RMS}[\delta_l]_{(n)}$ – это квадратные корни из накопленного экспоненциально затухающего градиента ошибки (13) для корректируемых параметров на шаге n :

$$\text{RMS}[\delta_l]_{(n)} = \sqrt{E[\delta_l]_{(n)} + e}. \quad (15)$$

$\text{RMS}[\Delta\varphi_l / \Delta\omega_l]_{(n-1)}$ – это аналогичный (13) накапливаемый параметр, но рассчитанный для чистых приращений $\Delta\varphi_l$ и $\Delta\omega_l$ между шагом n и $n-1$.

Для метода ADAGRAD коррекция весов предполагает накопление только квадрата градиента ошибки без экспоненциального затухания:

$$\Delta\varphi_l^{(n)} = -\frac{\eta}{\sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial E^{(n)}}{\partial \varphi_l^{(n)}}\right)^2} \cdot \frac{\partial E^{(n)}}{\partial \varphi_l^{(n)}}; \Delta\omega_l^{(n)} = -\frac{\eta}{\sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial E^{(n)}}{\partial \omega_l^{(n)}}\right)^2} \cdot \frac{\partial E^{(n)}}{\partial \omega_l^{(n)}}. \quad (16)$$

В качестве последней модели адаптивной коррекции весов предполагалась экспериментально полученная модель линейных приращений шага обучения (обозначим ее как proposed)

$$\Delta\varphi_l^{(n)} = -\left| \frac{k \cdot \frac{\partial E^{(n)}}{\partial \varphi_l^{(n)}}}{\eta} + \eta \cdot \frac{\partial E^{(n)}}{\partial \varphi_l^{(n)}} \right|; \Delta\omega_l^{(n)} = -\left| \frac{k \cdot \frac{\partial E^{(n)}}{\partial \omega_l^{(n)}}}{\eta} + \eta \cdot \frac{\partial E^{(n)}}{\partial \omega_l^{(n)}} \right|, \quad (17)$$

где k – это эмпирический подбираемый параметр. Для стабилизации процесса обучения было решено внедрить в модель регуляризацию вида «эластичной сети» [15], которая добавляет в целевую функцию штрафы по корректируемому параметру. Для конкретной модели на примере φ_l она будет иметь вид:

$$L\left(\frac{\partial E^{(n)}}{\partial \varphi_l^{(n)}}\right) = \frac{\partial E^{(n)}}{\partial \varphi_l^{(n)}} + \lambda_1 \cdot \text{sgn}(\varphi_l^{(n)}) + 2 \cdot \lambda_2 \cdot |\varphi_l^{(n)}|, \quad (18)$$

где λ_1 и λ_2 – это коэффициенты регуляризации, $E_1^{(n)}$ – целевая функция ошибки. Для ω_l регуляризация выглядит аналогично. Коэффициенты регуляризации подбирались экспериментально ($\lambda_1 = 0.001$ и $\lambda_2 = 0.15$).

Для численного эксперимента использовалась сеточная модель с 50-ю шагами по временной сетке и 100x100 шагов по пространственной сетке. Критерием оценки эксперимента является количество эпох обучения, которые приводят к ошибке по MAE равной 40 °C за не более чем 400 эпох обучения. В таблице 1 представлены результаты сравнения моделей с разными ЦФ (M1 – модель с ЦФ Хьюбера ($d = 250$), M2 – модель с ЦФ квадрата невязки) и различными оптимизаторами, усредненные по 6-ти независимым экспериментам для каждой комбинации «модель/оптимизатор». Параметры k , $\bar{\rho}$ и e выбраны экспериментально. Результат не оценивался, если процесс обучения занимал более чем 400 эпох обучения.

Для модели M2 с оптимизатором ADADELTA ($\rho = 0.90$, $e = 1e-2$) за 6 независимых экспериментов достичь сходимости за 400 эпох обучения не

удалось, однако, для модели M1 имеется конечный результат. Предполагается, что данный факт связан со слишком медленным затуханием градиента ошибки, который по значению является крайне малым, что обеспечивает слишком маленький шаг обучения и, как следствие, затягивает весь процесс обучения.

В результате численного эксперимента было установлено, что модель оптимизации (17) лучше в среднем подходит для квадратичной целевой функции и в меньшей мере для функции Хьюбера, тогда как модели (14) и (16) – наоборот. Модели оптимизации (14) и (16) для квадратичной ошибки в рамках поставленной задачи применить затруднительно, что может быть связано с быстрым затуханием квадрата градиента, который используется в оптимизаторах (14) и (16). Экспериментально в работе [10], а также в текущем численном тесте было выявлено, что градиент ошибки практически всегда лежит в интервале от 0 до 1 и стремится к 0.

Таблица 1

Результаты численного эксперимента

	M1	t (M1)	M2	t (M2)
Proposed ($\eta = 0.01, k = 1$)	48 эпох	150 с	47 эпох	130 с
Proposed ($\eta = 0.01, k = 2$)	56 эпох	120 с	34 эпохи	110 с
Proposed ($\eta = 0.01, k = 4$)	36 эпох	80 с	41 эпох	120 с
ADAGRAD	96 эпох	250 с	112 эпох	300 с
ADADELTA ($\rho = 0.95, e = 1e-6$)	152 эпохи	390 с	109 эпох	330 с
ADADELTA ($\rho = 0.99, e = 1e-3$)	110 эпох	350 с	77 эпох	240 с
ADADELTA ($\rho = 0.90, e = 1e-2$)	381 эпоха	650 с	–	–

Заключение. Экспериментально было установлено, что функция Хьюбера в рамках данной вариационной задачи влияет лишь на устойчивость процесса обучения, и никак не влияет на скорость сходимости, вопреки сделанному ранее предположению. Кроме того, из результатов численного эксперимента (таблица 1) можно заметить, что оптимизаторы ADADELTA и ADAGRAD слишком сильно замедляют процесс обучения как для квадратичной функции, так и для функции Хьюбера по сравнению с предлагаемым оптимизатором. Данный факт может быть связан с малыми значениями градиента ошибки, установленными экспериментально в работе [10] и его быстрым затуханием. Таким образом, при решении смежной вариационной задачи, представленной в работе [10], для увеличения скорости сходимости нет существенной разницы в замене целевого критерия на функцию Хьюбера. Также нецелесообразно использовать оптимизаторы, применяющие квадрат градиента ошибки для коррекции шага обучения.

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке гранта Президента РФ (МД-1787.2022.4).

Библиографический список

1. Новикова, В.Д. Большие данные в промышленности / В.Д. Новикова // Современная наука: актуальные вопросы и перспективы развития: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции. – Нефтекамск: «Мир науки», 2019. – С. 225–228.
2. Радионова, Л.В. Цифровизация в металлургической промышленности / Л.В. Радионова, А.В. Брык, Т.А. Лисовская, М.А. Жлудов, Р.А. Лисовский // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей. – М.: «КОНВЕРТ», 2019. – Т.2. – С. 57–66.
3. Фомин, А.В. Построение математической модели давления в рабочем пространстве многозонной печи / А.В. Фомин, П.И. Жуков // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2022. – №. 1. – С. 19–25.
4. Hadjiski, M. Advanced Process Control of Distributed Parameter Plants by Integration First Principle Modeling and Case-Based Reasoning: Part 1: Framework of DPP Control with Initial Uncertainty / M. Hadjiski, N. Deliiski // Proceedings of 2020 International Conference Automatics and Informatics. – Varna: IEEE, 2020. – 6 p.
5. Парсункин, Б.Н. Экстремально-оптимизирующее автоматизированное управление нагревом непрерывнолитых заготовок в печах проходного типа / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Е.Ю. Мухина // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2021. – №. 5 (104). – С. 22–34.
6. Zhukov, P. Comparison of finite-difference and data-based models of temperature transfer process in heating furnaces for cast billet temperature prediction / P. Zhukov, A. Fomin, A. Glushchenko, E. Podvalnyi // Proceedings of 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency. – Lipetsk: IEEE, 2021. – P. 811–816.
7. Брыков, Н.А. Решение нелинейной нестационарной задачи теплопроводности / Н.А. Брыков // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – №. 5-3 (47). – С.52–55.
8. Жуков, П.И. Адаптация значений коэффициентов теплопереноса для сеточной модели нестационарного нагрева стали / П.И. Жуков, А.И. Глущенко, А.В. Фомин // Управление большими системами: труды XVII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. – М.: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2021. – С. 521–532.
9. Дабас, М.Р. Адаптация математической модели теплового режима полосы в чистой группе клетей стана горячей прокатки / М.Р. Дабас, Н.С. Зубкова, А.А. Кобзев // Управление большими системами: труды XVII Всероссийской школы-конференции молодых ученых. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2021. – С. 515–520.
10. Zhukov, P. Implicit adaptation of mesh model of transient heat conduction problem / P. Zhukov, A. Glushchenko, A. Fomin // arXiv preprint arXiv:2207.00444. – 2022. – P. 1–30.
11. Ketkar, N. Deep learning with Python / N. Ketkar. – Berkeley: Apress. – 2017. – 226 p.

12. Hastie, T. The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction / T. Hastie, R. Tibshirani, J.H. Friedman. – New York: Springer, 2009. – Vol. 2. – 758 p.
13. Zeiler, M.D. ADADELTA: an adaptive learning rate method / M.D. Zeiler // arXiv preprint arXiv:1212.5701. – 2012. – 6 p.
14. Duchi, J. Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization / J. Duchi, E. Hazan, Y. Singer // Journal of machine learning research. – 2011. – Vol. 12, No. 7. – P.1–39.
15. De Mol, C. Elastic-net regularization in learning theory / C. De Mol, E. De Vito, L. Rosasco // Journal of Complexity. – 2009. – Vol. 25, No. 2. – P. 201–230.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОЛЕЗНОСТИ ЖИЛОЙ НЕДВИЖИМОСТИ

М.В. Иванова

Рассмотрена зависимость цены квадратного метра жилой недвижимости от показателей полезности этого жилья для покупателя. Построены графики зависимости цены от параметров. Приведены формулы связи полезности с ценой квадратного метра. Функция полезности жилья для покупателя выражена через факторы полезности и цену квадратного метра жилья.

Ключевые слова: рынок жилья, квартира, дом, ценообразование жилья, цена квадратного метра, полезность.

Согласно данным АИЖК с 2019 по 2021 год в России количество продаж квартир в новостройках увеличилось на 24%, то есть с 697 тыс. шт. до 865 тыс. шт. [1]. Так как вопрос покупки недвижимости в настоящее время является актуальным, то предлагается составить регрессионную модель, отражающую ценообразование недвижимости.

Различные авторы исследовали тему ценообразования на рынке жилья. Так, разработаны эконометрические модели, в том числе те, на основе которых делается вывод о том, что стоимость недвижимости на 85% определяется стоимостью в предыдущий период времени [2], модели, которые учитывают параметры жилой площади, площади кухни и дополнительной площади объекта недвижимости, типа дома и этажа квартиры [3], параметры жилой и дополнительной площади и площади кухни, этажности самой квартиры и дома в целом, материала дома, планировки квартиры, логарифма расстояния до центра города [4], параметры числа маршрутов всех видов транспорта, проходящих через ближайшую от дома остановку и количества времени на дорогу до городского центра на личном и общественном транспорте [5], параметры общей площади квартиры, площади кухни, этажа, вида санузла и материала постройки [6], и такие модели, которые сегментируют объекты по этажности [7, 8].

В другой работе сделан вывод о том, что увеличение общей площади объекта жилой недвижимости ведет к снижению стоимости квадратного метра [9]. Также исследовалось влияние комфортности на ценообразование на рынке недвижимости [10], изучалось моделирование ценообразования на рынке жилой недвижимости путем построения моделей причинно-следственной связи между спросом, предложением и ценой, а также между факторами, формирующими финансовые возможности покупателей [11].

Рассмотрим выбор недвижимости покупателем, который основан на максимизации функции полезности, выраженная формулой

$$U = \prod_{j=1}^J (a_j)^{e_j}, \quad (1)$$

где a_j – оценка параметра ($a_j = \frac{\pi(o)_j}{\pi(a)_j}$, если j -й параметр должен максимизироваться, $a_j = \frac{\pi(a)_j}{\pi(o)_j}$, если j -й параметр должен минимизироваться, где $\pi(o)_j$, $\pi(a)_j$ – значение параметра или фактора полезности оцениваемого объекта и аналога); e_j – коэффициенты значимости.

В качестве аналога будет выступать недвижимость, обладающая максимальными значениями всех показателей, иными словами, идеальная недвижимость. Коэффициенты значимости будут приниматься равными единице.

В качестве оцениваемых параметров факторов полезности предлагается использовать те, которые оказывают влияние на выбор покупателя, то есть используются показатели качества покупаемого жилья:

- общая площадь жилья (кв. м.),
- транспортная доступность (в км),
- материал строений (теплопроводность, Вт/м*К),
- срок эксплуатации жилья (лет),
- срок с последнего капитального ремонта (для объектов недвижимости типа «квартира», лет),
- уровень загрязнения воздуха (AQI),
- этажность дома (количество этажей),
- площадь земельного участка (для объектов недвижимости типа «дом», 100 кв.м.).

Предположим, что перечисленные параметры связаны с ценами на квадратный метр жилой недвижимости. Таким образом можно построить регрессии, которые в общем виде выражаются следующим образом:

$$p = a\pi_1 + b\pi_2 + c\pi_3 + \dots$$

Для построения значимых регрессионных моделей необходимо оценить влияние параметров на цену квадратного метра с помощью метода корреляционного анализа.

После анализа степени влияния факторов на цену квадратного метра жилья было выявлено, что для разных типов недвижимости на цену квадратного метра этих объектов недвижимости влияют разные факторы. Влияние факторов на цены квадратного метра (коэффициенты корреляции) объектов недвижимости типа «квартира», а также фактические данные об объектах указаны в табл. 1. [12–14]. Фактические данные взяты за июль 2022 года.

Таблица 1

Корреляционная зависимость цен квадратного метра объекта недвижимости типа «квартира» от факторов полезности

Объект недвижимости, №	Цена кв.м. квартиры, руб.	Факторы полезности							
		Общая площадь, кв.м.	доступность, расстояние до остановки, км.	Теплопроводность, Вт/м*К	Срок эксплуатации дома, лет	Ур-ь загрязнения воздуха, AQI	Расстояние до исторического центра города, км	Срок службы последнего капитального ремонта, лет	Этажность дома, кол-во этажей
1	82066	32	0,564	0,81	46	19	8,66	3	9
2	63179	71	0,564	0,81	46	19	8,66	3	9
3	70011	107	0,059	0,81	92	18	0	0	3
4	113765	29	0,19	1,7	44	18	0,442	2	9
5	97285	22	0,19	1,7	44	18	0,442	1	9
...
38	69920	37	0,104	1,7	40	18	9,18	2	12
39	62500	54	0,104	1,7	40	18	9,18	2	12
40	58608	54	0,104	1,7	40	18	9,18	2	12
Коэффициент корреляции		-0,2	-0,19	0,25	-0,35	0,13	-0,49	-0,01	0,26

Таблица 2

Корреляционная зависимость цен квадратного метра объекта недвижимости типа «дом» от факторов полезности

Объект недвижимости, №	Цена кв.м. квартиры, руб.	Факторы полезности							
		Общая площадь, кв.м.	расстояние до остановки, км.	Теплопроводность, Вт/м*К	Срок эксплуатации дома, лет	Ур-ь загрязнения воздуха, AQI	Расстояние до исторического центра города, км	Площадь участка, сот	Этажность дома, кол-во этажей
1	94988	102	10,6	1,01	0,81	1	18	5	2
2	66820	217	1,23	0,601	0,81	1	18	4,33	3
3	19167	63	0,50	0,008	0,81	3	19	1,24	1
4	76471	240	1,52	0,704	0,81	9	18	2,2	2
5	85000	350	0,99	0,912	0,81	10	18	4	3
...
30	23000	51	0	0,1	0,14	45	19	2	1
31	140541	44,8	0,66	2,49	0,14	52	18	4,83	1
32	30000	50	4,53	0,241	0,14	66	19	4	1
Коэффициент корреляции		0,52	0,60	0,38	-0,37	-0,13	-0,07	-0,2	0,71

Так, на цену квадратного метра квартиры наибольшее влияние оказывают параметры срока эксплуатации дома (лет), расстояния до исторического центра города (км) и этажности дома (кол-во этажей).

Влияние факторов на цены квадратного метра (коэффициенты корреляции) объектов недвижимости типа «дом», а также фактические данные об объектах указаны в табл. 1. [12–14]. Фактические данные взяты за июль 2022 года.

На цену квадратного метра частного дома наибольшее влияние оказывают факторы транспортной доступности (км), этажности (кол-во этажей) и общей площади жилья (кв.м.).

Изобразим зависимости цены квадратного метра жилья от факторов полезности. Добавим на графике с фактическими значениями график с расчетными значениями. При этом при построении графика для одного фактора полезности брались фиксированные средние значения для других показателей.

На рис. 1 представлены значения зависимости цены квадратного метра жилой недвижимости типа «квартира» от фактора полезности «срок эксплуатации».

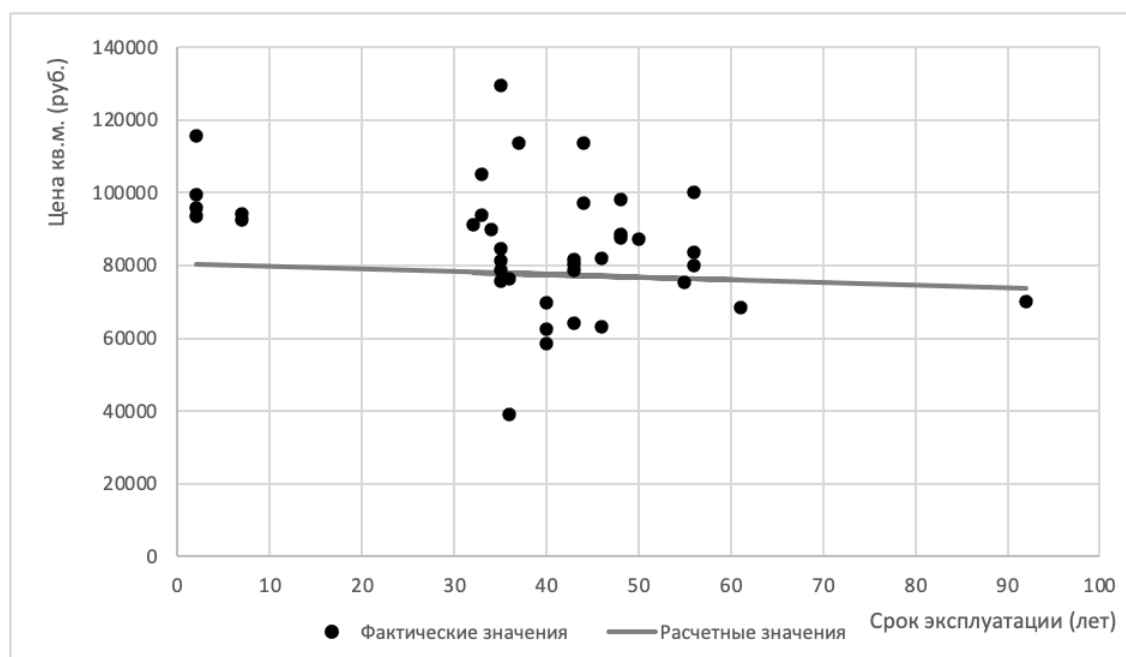


Рис. 1. Фактическая и расчетная зависимости цены квадратного метра квартиры от фактора полезности «срок эксплуатации»

На рис. 2 представлены значения зависимости цены квадратного метра жилой недвижимости типа «квартира» от фактора полезности «расстояние до исторического центра».

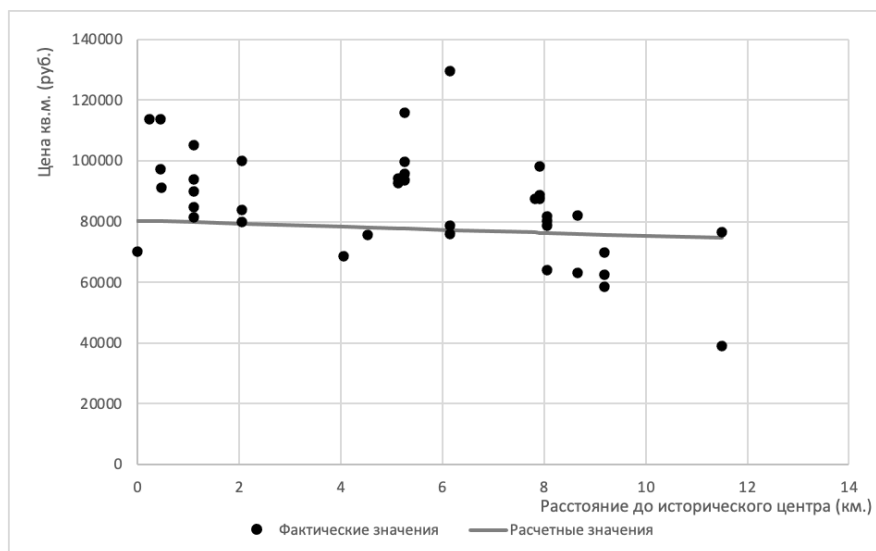


Рис. 2. Фактическая и расчетная зависимости цены квадратного метра квартиры от фактора полезности «расстояние до исторического центра»

На рис. 3 представлены значения зависимости цены квадратного метра жилой недвижимости типа «квартира» от фактора полезности «этажность».

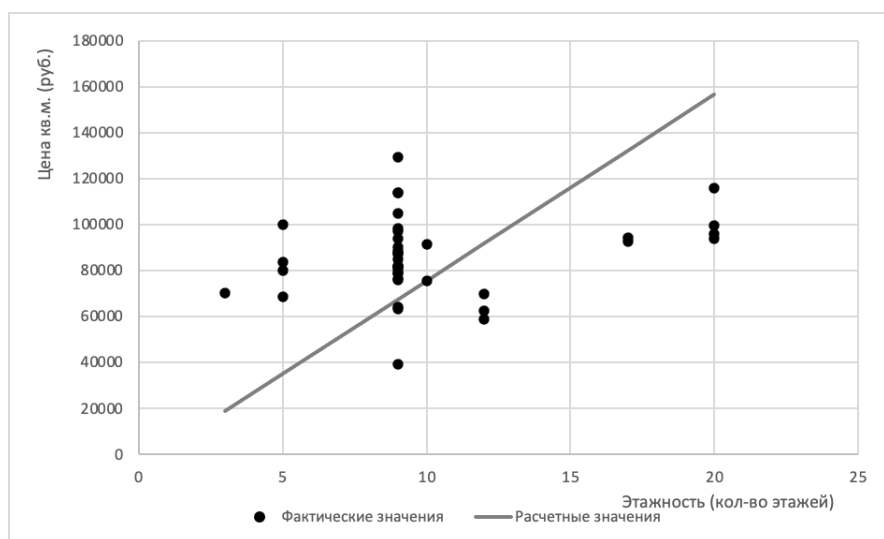


Рис. 3. Фактическая и расчетная зависимости цены квадратного метра квартиры от фактора полезности «этажность»

На основе анализа можно построить регрессионную функцию. Для типа жилья «квартира» функция выглядит следующим образом:

$$p_{\text{КВ}} = -73,56\pi_1 - 500,67\pi_2 + 8101,9\pi_3,$$

где $p_{\text{КВ}}$ – цена кв.м. квартиры, π_1 – срок эксплуатации дома (лет), π_2 – расстояние от дома до исторического центра города (км.), π_3 – этажность дома (кол-во этажей).

Для оценки адекватности модели рассчитываются показатели R^2 и критерий Фишера. Для построенной модели коэффициент детерминации $R^2 = 0,84$, расчетный критерий Фишера $F_{расч} = 195,56$, табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 0,05 $F_{табл} = 1,71$. Регрессионная модель является адекватной.

На рис. 4 представлены значения зависимости цены квадратного метра жилой недвижимости типа «дом» от фактора полезности «транспортная доступность». На рис. 5 представлены значения зависимости цены квадратного метра жилой недвижимости типа «дом» от фактора полезности «этажность». На рис. 6 представлены значения зависимости цены квадратного метра жилой недвижимости типа «дом» от фактора полезности «площадь жилья».

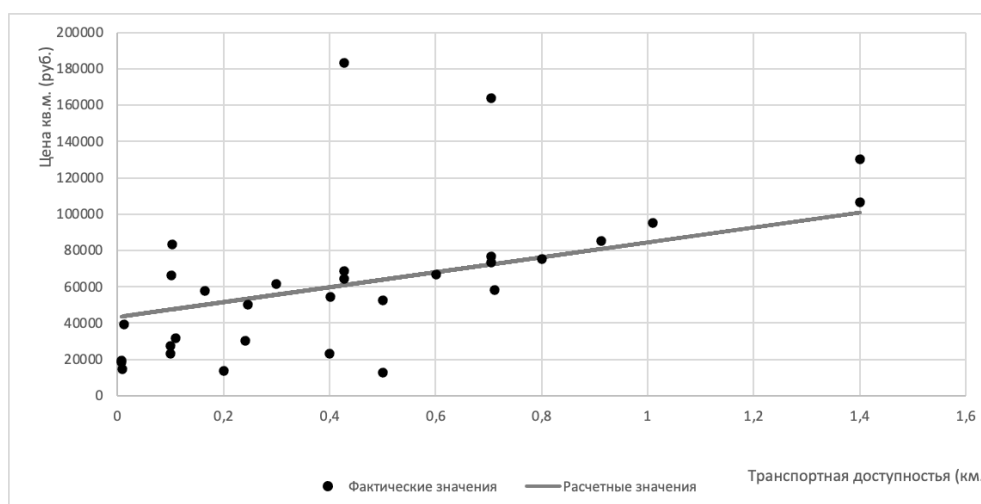


Рис. 4. Фактическая и расчетная зависимости цены квадратного метра дома от фактора полезности «транспортная доступность»

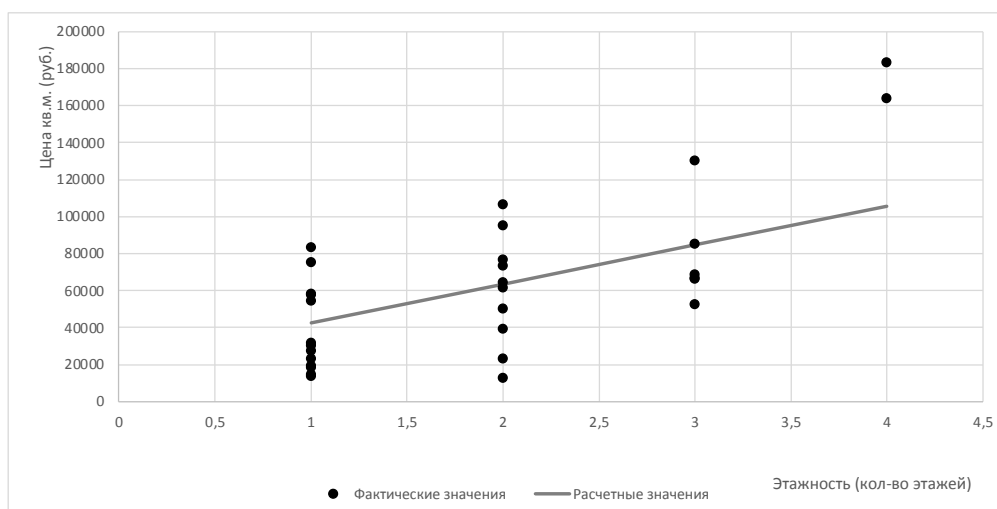


Рис. 5. Фактическая и расчетная зависимости цены квадратного метра дома от фактора полезности «этажность»

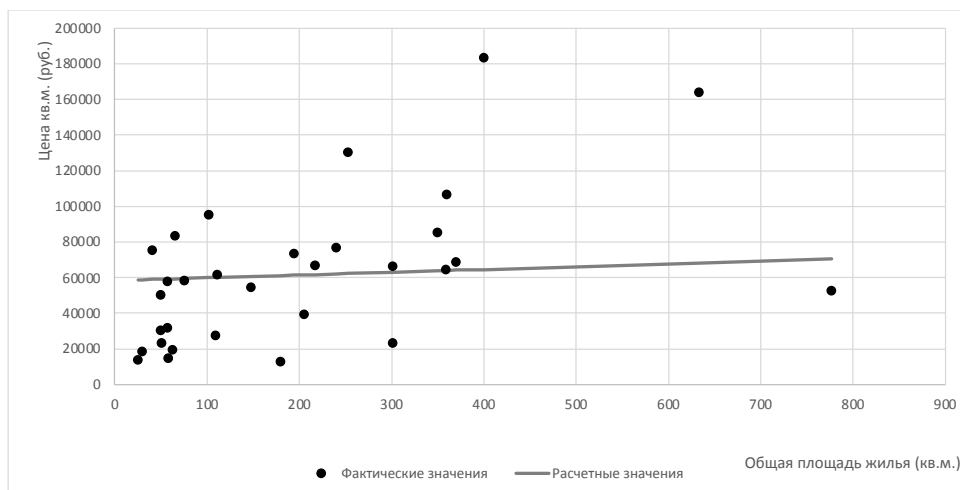


Рис. 6. Фактическая и расчетная зависимости цены квадратного метра дома от фактора полезности «площадь жилья»

Для типа жилья «дом» функция выглядит следующим образом:

$$p_d = 41001,56\pi_1 + 21100,76\pi_2 + 15,6\pi_3$$

где p_d – цена кв.м. дома, π_1 – транспортная доступность, расстояние до ближайшей от дома остановки (км.), π_2 – этажность (кол-во этажей), π_3 – общая площадь дома (кв.м.).

Для оценки адекватности модели рассчитываются показатели R^2 и критерий Фишера. Для построенной модели коэффициент детерминации $R^2 = 0,61$, расчетный критерий Фишера $F_{расч} = 46,86$, табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 0,05 $F_{табл} = 1,83$. Регрессионная модель является адекватной.

Можно сделать вывод о том, что параметр цены квадратного метра жилья связана с показателем полезности (1) следующим образом. Для квартиры:

$$U_{кв} = \frac{\pi(a)_1}{\pi(o)_1} * \frac{\pi(a)_2}{\pi(o)_2} * \frac{\pi(o)_3}{\pi(a)_3} = \frac{-a*\pi(a)_1}{-p_{кв}+b\pi(o)_2+c\pi(o)_3} * \frac{-b*\pi(a)_2}{-p_{кв}+a\pi(o)_1+c\pi(o)_3} * \frac{p_{кв}-a\pi(o)_1-b\pi(o)_2}{c*\pi(a)_3}$$

После проведения преобразований получим:

$$U_{кв} = \frac{73,56*\pi(a)_1*500,67*\pi(a)_2*(p_{кв}+73,56\pi(o)_1+500,67\pi(o)_2)}{(-p_{кв}-500,67\pi(o)_2+8101,9\pi(o)_3)*(-p_{кв}-73,56\pi(o)_1+8101,6\pi(o)_3)*8101,9*\pi(a)_3}$$

Для дома:

$$U_d = \frac{\pi(o)_1}{\pi(a)_1} * \frac{\pi(o)_2}{\pi(a)_2} * \frac{\pi(o)_3}{\pi(a)_3} = \frac{p_{кв}-b\pi(o)_2-c\pi(o)_3}{a*\pi(a)_1} * \frac{p_{кв}-a\pi(o)_1-c\pi(o)_3}{b*\pi(a)_2} * \frac{p_{кв}-a\pi(o)_1-b\pi(o)_2}{c*\pi(a)_3}$$

После проведения преобразований получим:

$$U_d = \frac{(p_d-21100,76\pi(o)_2-15,6\pi(o)_3)*(p_d-41001,56\pi(o)_1-15,6\pi(o)_3)*(p_d-41001,56\pi(o)_1-21100,76\pi(o)_2)}{41001,56*21100,76*15,6*\pi(a)_3}$$

Заключение. Таким образом, предложены модели, которые выражают полезность в денежной форме. Предложенные модели отражают

зависимость полезности покупателя при приобретении объекта недвижимости не только от факторов полезности, но и от цен на квадратный метр этих объектов и представляют количественную теорию полезности

Библиографический список

1. Обзор рынка ипотечного кредитования в 2021 году Дом.рф [Электронный ресурс]. – Дата обновления: 23.04.2022. – URL: <https://xn--d1aqf.xn--p1ai/> (дата обращения 27.04.2022).
2. Беккер, В.А. Разновидности и повторяемость дефектов и повреждений панельных зданий на основе результатов натурных исследований / В.А. Беккер, А.Н. Нарушевич // Известия вузов. Строительство. – 2005. – № 8. – С. 97–99.
2. Тиндова, М.Г. Эконометрический анализ ценообразования жилой недвижимости / М.Г. Тиндова, А.А. Максимов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – №2 (18).
3. Стебунова, О.И. Моделирование ценообразования на вторичном рынке жилья / О.И. Стебунова // Вестник ОГУ. – 2012. – №13 (149).
4. Харламов, А.В. О статистическом методе построения прогноза цены недвижимости по неоднородным данным / А.В. Харламов // Изв. Саратов. ун-та Нов. сер. Сер. Экономика. Управление. Право. – 2019. – №2.
5. Сидоровых, А.С. Оценка влияния транспортной доступности на цены недвижимости / А.С. Сидоровых // Прикладная эконометрика. – 2015. – №1 (37).
6. Козлова, Н.Г. Моделирование ценообразования на рынке жилой недвижимости (на примере г. Нур-Султан) / Н.Г. Козлова, М.С. Айтенова // Вестник РУК. – 2022. – №1 (47).
7. Харламов, А.В. Временной анализ эконометрических моделей ценообразования на рынке жилья / А.В. Харламов, А.В. Захаров // Имущественные отношения в РФ. – 2019. – №3 (210).
8. Харламов, А.В. К вопросу о моделях ценообразования и сегментации рынка жилой недвижимости / А.В. Харламов, А.В. Захаров // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. – 2019. – №1 (75).
9. Азнабаев, А.М. Определение влияния «Фактора площади» на стоимость объектов жилой недвижимости / А.М. Азнабаев // Вестник Башкирск. ун-та. – 2010. – №4.
10. Степанов, И.Г. Количественная оценка комфортности жилья и ее влияние на ценообразование на рынке недвижимости / И.Г. Степанов, О.И. Матасова // Вестник ЮУрГУ. Серия: Экономика и менеджмент. – 2011. – №8 (225).
11. Минц, А.Ю. Моделирование ценообразования на рынке жилой недвижимости методами системной динамики / А.Ю. Минц // ТАРП. – 2016. – №4 (31).
12. Домклик, Купить [Электронный ресурс]. – Дата обновления: 23.04.2022. – URL: <https://samara.domclick.ru> (дата обращения 31.07.2022).
13. AccuWeather [Электронный ресурс]. – Дата обновления: 23.04.2022. – URL: <https://www.accuweather.com/> (дата обращения 31.07.2022).

14. Фонд капитального ремонта Самарской области, Капитальный ремонт в вашем доме [Электронный ресурс]. – Дата обновления: 23.04.2022. – URL: <https://fcrso.ru/overhaul> (дата обращения 31.07.2022).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИ ИСКАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

А.А. Замышляева, О.Н. Цыпленкова

Задача восстановления динамически искаженного сигнала рассматривается как задача оптимального управления решениями стохастической системы леонтьевского типа. Для этого математическая модель динамических измерений редуцируется к уравнению соболевского типа первого порядка в пространствах случайных процессов, доказывается теорема о существовании единственного оптимального управления, которое и является оптимальным динамическим измерением.

Ключевые слова: динамические измерения, аддитивный «шум», уравнение соболевского типа, сильные решения, оптимальное управление.

Рассмотрим стохастическую систему леонтьевского типа, которой определяются динамические свойства измерительного устройства (ИУ) [1]

$$\begin{cases} L\dot{x} = Ax + Bu + G\xi, & (1) \\ y = Cx + D\eta, & (2) \end{cases}$$

а в начале работы состояние измерительного устройства задается начальным условием Шоултера – Сидорова [2]

$$[(\alpha L - A)^{-1}L]^{p+1}(x(0) - x_0) = 0 \quad (3)$$

для некоторых $x_0 \in R^n$ и $\alpha \in \rho^L(A) = \{\alpha \in C : \det(\alpha L - A) \neq 0\}$.

В данную математическую модель измерительного устройства (1), (2) входят функции: $x(t)$, которая описывает состояние ИУ; $\dot{x}(t)$, представляющая скорость изменения состояния ИУ; $y(t)$ и $u(t)$, описывающие наблюдения и измерения, соответственно; $\xi(t)$ задает помехи на выходе ИУ, а $\eta(t)$ – в цепях ИУ. Здесь A и L – квадратные матрицы состояний и взаимного влияния скоростей изменения состояния измерительного устройства, соответственно; C и D – матрицы, которые характеризуют связи между состоянием измерительного устройства и наблюдением [3].

Задачу (1), (3) редуцируем к уравнению соболевского типа [4]

$$L\dot{x} = Ax + Bu + G\xi, \quad (4)$$

с условием

$$\lim_{t \rightarrow 0+} P(x(t) - x_0) = 0, \quad (5)$$

где L, A – линейные непрерывные операторы, определенные на гильбертовом пространстве V , действующие в гильбертово пространство G .

Сигнал на входе ИУ будем искать как решение задачи оптимального управления [5]. Для этого найдем пару функций (\hat{x}, \hat{u}) , первая из которых является решением задачи (1), (3), а функция \hat{u} из $U_{ad} \subset U$, удовлетворяющая соотношению

$$J(y(\hat{x}), \hat{u}) = \min_{(x,u)} J(y(x), u), \quad (6)$$

является оптимальным динамическим измерением. Здесь U является сепарабельным гильбертовым пространством управлений, а U_{ad} – замкнутое выпуклое множество в нем.

1. Пространства «шумов». Стохастические \mathbf{K} -процессы. Стохастические уравнения соболевского типа

Обозначим через \mathbf{L}_2 гильбертово пространство случайных величин с нулевым математическим ожиданием ($\mathbf{E}\xi = 0$) и конечной дисперсией, через $C(I, \mathbf{L}_2)$ – множество непрерывных случайных процессов. Пусть $\{\phi_k\}$ определяет ортонормированный базис в вещественном сепарабельном гильбертовом пространстве V . Обозначим через $V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2$ гильбертово пространство, являющееся пополнением линейной оболочки случайных величин

$$\eta = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_k} \xi_k \phi_k$$

с нормой

$$\|\eta\|_V^2 = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k D\xi_k.$$

Здесь последовательность $K = \{\lambda_k\} \subset R_+$: $\sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k < +\infty$, а $\{\xi_k\} \subset \mathbf{L}_2$ – последовательность случайных величин. Элементы $V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2$ назовем V -значными \mathbf{K} -случайными величинами. Отображение $\eta: I \rightarrow V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2$, заданное формулой

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_k} \eta_k(t) \phi_k, \text{ где } \{\eta_k\} \subset C(I, \mathbf{L}_2),$$

называется непрерывным V -значным стохастическим \mathbf{K} -процессом, если ряд с правой стороны сходится равномерно на любом компакте в I по норме $\|\cdot\|_{V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2}$, и траектории процесса $\eta = \eta(t)$ почти наверное непрерывны.

Обозначим через $C(I, V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2)$ – пространство непрерывных V -значных стохастических \mathbf{K} -процессов, и через $C^l(I, V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2)$ – пространство

непрерывно дифференцируемых по Нельсону – Гликлиху [6] до порядка $l \in \mathbb{N}$ V -значных стохастических \mathbf{K} -процессов.

Пусть операторы $L, A \in \mathcal{L}(V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2, G_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2)$. Построим проекторы

$$P = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} R_{\mu}^L(A) d\mu \in \mathcal{L}(V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2), \quad Q = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} L_{\mu}^L(A) d\mu \in \mathcal{L}(G_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2).$$

Здесь $R_{\mu}^L(A) = (\mu L - A)^{-1}L$ и $L_{\mu}^L(A) = L(\mu L - A)^{-1}$ - правая и левая L -резольвенты оператора A . Положим $V_{\mathbf{K}}^0\mathbf{L}_2 (V_{\mathbf{K}}^1\mathbf{L}_2) = \ker P (\operatorname{im} P)$, $G_{\mathbf{K}}^0\mathbf{L}_2 (G_{\mathbf{K}}^1\mathbf{L}_2) = \ker Q (\operatorname{im} Q)$. Пространства $V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2$ и $G_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2$ могут быть представлены как $V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2 = V_{\mathbf{K}}^0\mathbf{L}_2 \oplus V_{\mathbf{K}}^1\mathbf{L}_2$ и $G_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2 = G_{\mathbf{K}}^0\mathbf{L}_2 \oplus G_{\mathbf{K}}^1\mathbf{L}_2$, причем $V_{\mathbf{K}}^0\mathbf{L}_2 \supset \ker L$. Через $L_k(A_k)$ обозначим сужение оператора $L(A)$ на $V_{\mathbf{K}}^k\mathbf{L}_2$, $k = 0, 1$.

Лемма 1. Операторы $L_k, A_k \in \mathcal{L}(V_{\mathbf{K}}^k\mathbf{L}_2; G_{\mathbf{K}}^k\mathbf{L}_2)$, $k = 0, 1$; кроме того, существуют операторы $A_0^{-1} \in \mathcal{L}(G_{\mathbf{K}}^0\mathbf{L}_2; V_{\mathbf{K}}^0\mathbf{L}_2)$ и $L_1^{-1} \in \mathcal{L}(G_{\mathbf{K}}^1\mathbf{L}_2; V_{\mathbf{K}}^1\mathbf{L}_2)$.

Рассмотрим уравнение соболевского типа (4) в пространствах стохастических процессов. Обозначим для удобства $Vu(t) + G\xi(t) = \omega(t)$, $t \in I$.

Теорема 1. Пусть A является (L, p) -ограниченным оператором, $p \in \{0\} \cup \mathbb{N}$. Пусть функция случайных помех $\xi = \xi(t)$ удовлетворяет условиям

$$(I - Q)\xi \in C^{p+1}(I, G_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2) \text{ и } Q\xi \in C(I, G_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2). \quad (7)$$

Тогда для любой вектор-функции и такой, что

$$(I - Q)u \in C^{p+1}(I, U) \text{ и } Qu \in C(I, U), \quad (8)$$

и для любой случайной величины $x_0 \in V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2$, не зависящей от ξ , существует п.н. единственное решение $x \in C^1(I, V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2)$ задачи (4), (5), имеющее вид

$$x(t) = V(t)x_0 - \sum_{q=0}^p H^q A_0^{-1} (I - Q) \overset{\circ}{\omega}^{(q)}(t) + \int_0^t V(t-s) L_1^{-1} Q \omega(s) ds, \quad (9)$$

где $V(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} R_{\mu}^L(A) e^{\mu t} d\mu$, $t \in \mathbb{R}$ - голоморфная группа разрешающих операторов однородного уравнения (4).

2. Сильные решения и оптимальное управление

Пусть $L_2(I; V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2)$ - пространства случайных процессов, чьи траектории интегрируемы с квадратом на I .

Определение. Вектор-функция

$$x \in H^1(V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2) = \{x \in L_2(I; V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2) : \overset{\circ}{x} \in L_2(I; V_{\mathbf{K}}\mathbf{L}_2)\}$$

называется *сильным решением* (4), если она обращает уравнение в тождество п.в. на I . Сильное решение $x = x(t)$ уравнения (4) называется *сильным решением задачи* (4), (5), если оно удовлетворяет (5).

Теорема 2. Пусть A является (L, p) -ограниченным оператором, $p \in \{0\} \cup \mathbb{N}$. Пусть функция случайных помех $\xi \in H^{p+1}(G_K L_2)$ удовлетворяет условию (7). Тогда для любой вектор-функции u , удовлетворяющей условиям (8), и для любой случайной величины $x_0 \in V_K L_2$, не зависящей от ξ , существует п.н. единственное сильное решение задачи (1), (2).

Рассмотрим задачу (5) для уравнения соболевского типа с аддитивным «шумом» (4). В пространстве управлений

$$\mathring{H}^{p+1}(U) = \{u \in L_2(I; U) : u^{(p+1)} \in L_2(I; U)\}, \quad p \in \{0\} \cup \mathbb{N}$$

выделим замкнутое и выпуклое множество. Обозначим его $\mathring{H}_\delta^{p+1}(U)$ – множество допустимых управлений. Вектор-функция $\hat{u} \in \mathring{H}_\delta^{p+1}(U)$ – оптимальное управление решениями задачи (4), (2), (5), если она минимизирует функционал $J(y(x), u)$, т.е. выполнено (6).

Покажем однозначную разрешимость задачи оптимального управления. Нам нужно найти $\hat{u} \in \mathring{H}_\delta^{p+1}(U)$, которая будет удовлетворять соотношению (6), причем

$$J(y(x), u) = \sum_{q=0}^1 \int_0^\tau \| \overset{\circ}{y}^{(q)}(x(t, u), t) - \tilde{y}^{(q)}(t) \|^2 dt, \quad (10)$$

где $x(t, u)$ – сильное решение задачи (4), (5), $\tilde{y}(t)$ – заданное наблюдение, $y(x(t, u), t)$ определяется соотношением (2).

Теорема 3. Пусть A является (L, p) -ограниченным оператором, $p \in \{0\} \cup \mathbb{N}$. Пусть функция случайных помех $\xi = \xi(t) \in H^{p+1}(G_K L_2)$ удовлетворяет условию (7). Тогда для любой $\eta \in H^1(G_K L_2)$ существует единственное оптимальное управление решениями задачи (2), (4) – (6).

3. Восстановление динамически искаженного сигнала

Проведем редукцию задачи (1) – (3), (6) к (2), (4) – (6). Для этого введем в рассмотрение пространство $V = G = R^n$, последовательность $K = (\underbrace{1, 1, \dots, 1}_n, 0, \dots)$ и рассмотрим пространство состояний

$$X = \{x \in L_2(I, R^n L_2) : \dot{x} \in L_2(I, R^n L_2)\},$$

пространство измерений

$$U = \{u \in L_2(I, R^n) : u^{(p+1)} \in L_2(I, R^n)\}$$

и пространство наблюдений $Y = C[X]$.

Теорема 4. Пусть L и A – матрицы порядка $n \times n$, причем матрица A является (L, p) -регулярной и $\det A \neq 0$. Тогда для любых $\xi \in H^{p+1}(G_K \mathbf{L}_2)$, удовлетворяющих (7), $x_0 \in R^n \mathbf{L}_2$, $\eta \in H^1(R^n \mathbf{L}_2)$ существует единственное оптимальное управление решениями задачи (1)–(3), (6), являющееся оптимальным динамическим измерением, а также восстановленным входным сигналом ИУ.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант FENU-2020-0022 (2020072ГЗ).

Библиографический список

1. Shestakov, A.L. On the measurement of the “white noise” / A.L. Shestakov, G.A. Sviridyuk // Bulletin of the South Ural State University. Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. – 2012. – Vol. 27, No. 286. – P. 99–108.
2. Келлер, А.В. Некоторые обобщения задачи Шоуолтера – Сидорова для моделей соболевского типа / А.В. Келлер, С.А. Загребина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Математическое моделирование и программирование». – 2015. – Т. 8, №2. – С. 5–23.
3. Шестаков, А.Л. Восстановление динамически искаженного сигнала на основе теории оптимальных динамических измерений / А.Л. Шестаков, А.А. Замышляева, Н.А. Манакова, Г.А. Свиридюк, А.В. Келлер // Автоматика и телемеханика. – 2021. – №12. – С. 125–137.
4. Sviridyuk, G.A. Linear Sobolev Type Equations and Degenerate Semigroups of Operators / G.A. Sviridyuk, V.E. Fedorov // VSP, Utrecht, Boston, Koln, Tokyo. – 2003.
5. Zamyshlyayeva, A.A. Optimal Control in Linear Sobolev Type Mathematical Models / A.A. Zamyshlyayeva, N.A. Manakova, O.N. Tsyplenkova // Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. – 2020. – Vol. 13, No. 1. – P. 5–27.
6. Gliklikh, Yu.E. Global and Stochastic Analysis with Applications to Mathematical Physics / Yu.E. Gliklikh // London, Dordrecht, Heidelberg. – N.Y.: Springer, 2011.
7. Sviridyuk, G.A. Multipoint initial-final problem for one class of Sobolev type models of higher order with additive “white noise” / G.A. Sviridyuk, A.A. Zamyshlyayeva, S.A. Zagrebina // Bulletin of the South Ural State University. Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. – 2018. – Vol. 11, No. 3. – P. 103–117.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ВДОЛЬ ФРАГМЕНТАРНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Е.В. Каршаков, А.М. Гаракоев

В данной работе рассматривается постановка и решение задачи быстрогодействия, которая возникает при управлении движением по траектории, составленной из нескольких фрагментов. Фрагментами выступают прямолинейные участки траектории, при прохождении которых требуется минимизировать боковое отклонение. Для следования таким траекториям формулируются задачи быстрогодействия, решением которых являются траектории Дубинса. Именно они выбираются в дальнейшем в качестве программных траекторий при решении задачи управления движением. Задача решается на примере управления движением летательным аппаратом.

Ключевые слова: задача быстрогодействия, траектории Дубинса.

Введение. Задача управления движением вдоль фрагментарных кусочно-линейных траекторий возникает во многих приложениях: управление сельскохозяйственным роботом при обработке полей, мониторинг линейно-протяженных объектов, таких как трубопровод или линия электропередач, аэросъемка определенной территории по сети параллельных маршрутов с заданным межмаршрутным расстоянием и т. д. Традиционно при выполнении таких задач требуется последовательно переключать два основных режима управления:

- заход на очередной участок траектории с заданным курсом;
- движение вдоль прямолинейного участка траектории с минимальным отклонением.

Специфика рассматриваемой задачи при управлении летательным аппаратом заключается в том, что скорость данного подвижного объекта, как правило, довольно большая и изменяется в очень небольшом диапазоне.

Существуют различные подходы к решению данной задачи. Если речь идет о пилотируемом объекте, многие алгоритмы показывают пилоту карту с изображенными на ней линиями пути и положением управляемого объекта [1, 2]. Есть, однако, подходы, в которых даже для пилотируемой авиации вырабатываются управляющие команды, которые позволяют и оптимизировать заход на траекторию, и улучшить качество прохождения прямолинейного участка [3–5].

Ключевым в этих подходах является решение той или иной задачи быстрогодействия в каждый отсчет времени, отвечающий новой навигационной информации. Решением такой задачи быстрогодействия является траектория Дубинса [4, 6]. Далее излагается постановка и анализ возникающих задач быстрогодействия.

Уравнения движения. Наиболее общий вид кусочно фрагментарной траектории показан на рисунке 1. Здесь режиму «заход» соответствует фрагменты (4-5), (2-3), а режиму «стабилизация на маршруте» фрагменты (1-2), (5-6).

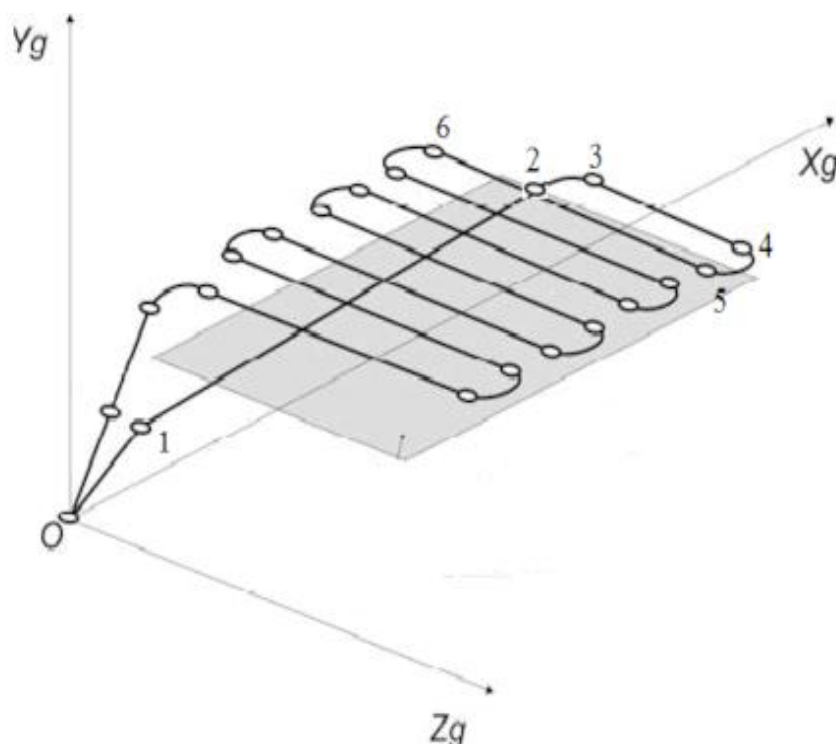


Рис. 1. Пример фрагментарной траектории

В данной задаче рассматривается следующая упрощенная постановка. Во-первых, высота полета в данной работе не рассматривается, задача решается в горизонтальной плоскости. Во-вторых, на данном этапе исследований пренебрегается изменением горизонтальной скорости объекта. Наконец, предполагается, что управление объектом сводится к кратковременным моментам действия постоянного вертикального углового ускорения для изменения направления движения. В случае самолета это соответствует кратковременному отклонению элеронов на фиксированный угол. При достижении определенного угла крена управление прекращается. В случае скомпенсированного разворота, когда он совершается так, что сумма центростремительного и гравитационного ускорений компенсируется

подъемной силой крыла, угол крена при фиксированной скорости однозначно связан с радиусом разворота.

Введем следующие обозначения: T – время (с), X, Y – локальные декартовы координаты объекта (м), φ – курс (путевой угол) движения объекта (рад), ω – скорость изменения курса (рад/с), V – характерная скорость движения объекта (м/с), U – управляющее воздействие (рад/с²).

Уравнения движения объекта с учетом сделанных предположений и введенных обозначений можно записать в следующей форме:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= V \cos \varphi, \\ \dot{Y} &= V \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} &= \omega, \quad \dot{\omega} = U.\end{aligned}\tag{1}$$

Приведем систему уравнений (1) к безразмерной форме. Для этого введем следующие безразмерные переменные: $V^* = V \sim 50$ м/с – характерная скорость летательного аппарата, например, самолета Ан-3; максимальное значение угла крена – $\gamma^* \sim 0,35$ рад, или примерно 20 градусов. В этом случае радиус скомпенсированного разворота R^* можно получить из соотношения

$$\operatorname{tg} \gamma^* = \frac{V^{*2}}{gR^*},\tag{2}$$

где g – ускорение силы тяжести, откуда $R^* \sim 700$ м. Теперь можно получить постоянную времени движения по траектории как $T_1 = R^*/V^* \sim 14$ с. Это время, за которое угол курса изменится на один радиан. Также мы должны взять в рассмотрение постоянную времени для четвертого уравнения системы (1) – время задания угла крена, которое составляет порядка $T_2 \sim 1$ с. Очевидно, что характерное значение угловой скорости $\omega^* = V^*/R^* = 1/T_1 \sim 0,07$ рад/с, а характерное значение углового ускорения $U^* = \omega^*/T_2 = 1/T_1 T_2 \sim 0,07$ рад/с².

Важно понимать, что величина U в уравнении (1) отлична от 0 только в моменты изменения угловой скорости, т. е. на интервалах времени $T \leq T_2$. Таким образом, решение системы (1) для угла курса это функция, линейная на интервалах времени порядка T_1 и более, и квадратичная на коротких переходных участках.

Введем безразмерные величины:

$$t = T/T^*, \quad x = X/R^*, \quad y = Y/Y^*, \quad w = \omega/\omega^*, \quad u = U/U^*,\tag{3}$$

тогда система (1) примет вид

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \frac{T^*}{T_1} \cos \varphi, \quad \dot{y} = \frac{T^*}{T_1} \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} &= \frac{T^*}{T_1} \omega, \quad \dot{\omega} = \frac{T^*}{T_2} u.\end{aligned}\tag{4}$$

Применяя теорию разделения движений [7], можно рассмотреть систему (4) в «быстром» $T^* = T_2$ и в «медленном» $T^* = T_1$ времени.

Рассмотрение в быстром времени имеет смысл только на интервале действия управления $u = \pm 1$. Действительно, если введем малый параметр $\varepsilon = T_2/T_1 \sim 0,07$. Тогда в нулевом приближении объект неподвижен и меняется только безразмерная угловая скорость w :

$$\dot{x} = \dot{y} = \dot{\varphi} = 0, \quad \dot{\omega} = u. \quad (5)$$

В медленном времени малый параметр возникает только в последнем уравнении системы (4):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \cos \varphi, \\ \dot{y} &= \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} &= \omega, \quad \dot{\omega} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, исходная система уравнений (1), описывающая движение нашего объекта, сведена к уравнению движений меньшей размерности (6), в котором управлением является величина w , ограниченная значениями на отрезке $[-1, 1]$. В размерном времени это соответствует диапазону изменения угловой скорости от $-0,07$ до $+0,07$ рад/с.

Согласно теореме Пуанкаре [7], решение системы (6) на интервале времени T_1 будет отличаться от решения (1) на величину порядка ε . Поскольку предполагается постоянно вычислять оптимальную траекторию исходя из текущих координат, которые обновляются несколько раз в секунду, данное расхождение не оказывает влияния на дальнейшее решение задачи управления.

Задача быстрогодействия. Для того, чтобы сформировать управляющее воздействие, требуется вычислить программную траекторию и определить расхождение текущей угловой скорости (скорости изменения курса) объекта и скорости, требуемой программной траекторией. Программная траектория может быть получена как оптимальная траектория для достижения минимума следующего функционала:

$$J = (x_T - x)^2 + (y_T - y)^2 + (\varphi_T - \varphi)^2 + (t_T - t)^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

В этом случае траектория приведет объект в точку с заданными координатами (x_T, y_T) с заданным курсом φ_T за минимальное время. Решение может быть получено с использованием принципа максимума Понтрягина [8]. Для задачи (6) оно известно. Данные уравнения описывают движение машины Дубинса [6, 9, 10]. Оптимальными траекториями являются траектории, состоящие из дуг окружности минимального радиуса (1, или для размерной задачи R^*) в начальной и конечной точках движения и прямолинейного участка, соединяющего по касательной эти дуги. Из четырех возможных траекторий (поворот может быть правым или левым как в начале, так и в конце траектории) для

заданных координат выбирается кратчайшая. Она и будет решением задачи быстродействия в режиме «заход».

В режиме «стабилизации на маршруте» нет необходимости прийти в фиксированную точку. Однако, надо в максимально близкой точке выйти на маршрут с заданным курсом. Здесь система координат выбирается специальным образом, так, что ось x совпадает с линией маршрута, ось y ей ортогональна, тогда $y_T = \varphi_T = 0$ в уравнении (7). В отличие от задачи «захода», конечная координата x_T здесь не задана, а является искомым параметром, как и время.

Учитывая, что в данном режиме отклонения не должны быть большими (иначе необходимо повторно выполнять заход), полагаем, что $-\pi/2 < \varphi < \pi/2$. В этом случае в качестве начальной части траектории Дубинса всегда выбирается та, что приведет к уменьшению абсолютной величины φ . Тем самым остается только два варианта траектории, из которых выбирается кратчайшая.

Дальнейшее управление строится на основе расхождения текущей величины ω и той, которая определяется вычисленной программной траекторией. Данное расхождение подается на вход ПИД-регулятора [3].

Заключение. В результате выполнения нормализации уравнения движения и введения малого параметра, исходные уравнения движения сведены к классической модели машины Дубинса, для которой известно решение задачи быстродействия.

Для упрощенной системы уравнений были получены две формы задачи быстродействия, для случая «захода» на заданный маршрут и для случая стабилизации объекта на заданном прямолинейном маршруте.

Полученные решения данных задач выбраны в качестве программных траекторий при решении задачи управления. Результаты проиллюстрированы на примере решения задачи управления летательным аппаратом.

Библиографический список

1. Жодзишский, П.Ю. Повышение эффективности выполнения аэрогеофизических исследований / П.Ю. Жодзишский, В.А. Пухватов // Геопрофи. – 2010. – № 2. – С. 23–25.

2. Тригубович, Г.М. Комплексная технология навигационного и геодезического обеспечения аэроэлектромагнитных исследований / Г.М. Тригубович, С.О. Шевчук, Н.С. Косарев, В.Н. Никитин // Гироскопия и навигация. – 2017. – № 1. – С. 93–107.

3. Каршаков, Е.В. Особенности алгоритмов управления летательным аппаратом при аэросъемке / Е.В. Каршаков // Проблемы управления. – 2012. – № 3. – С. 71–76.

4. Волковицкий, А.К. Алгоритмы управления движением по фрагментарной траектории / А.К. Волковицкий, А.М. Гаракоев // Материалы 16-й

Международной конференции «Устойчивость и колебания нелинейных систем управления» (конференция Пятницкого). – 2022. – С. 10 –105.

5. Karshakov, E.V. Formation of a director index to assist the pilot in conducting airborne geophysical survey / E.V. Karshakov, A.M. Shevchenko, A.M. Garakoev // International Workshop on Navigation and Motion Control (NMC 2020). – 2020. – P. 1–10.

6. Бузиков, М.Э. Перехват подвижной цели машиной Дубинса за кратчайшее время / М.Э. Бузиков, А.А. Галяев // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 5. – С. 3–19.

7. Новожилов, И.В. Фракционный анализ. / И.В. Новожилов. – М.: Изд-во мех-мат ф-та МГУ, 1995. – 224 с.

8. Александров, В.В. Оптимизация динамики управляемых систем: Учебное пособие. // В.В. Александров, В.Г. Болтянский, С.С. Лемак, Н.А. Парусников, В.М. Тихомиров. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 304 с.

9. Hota, S. A modified Dubins method for optimal path planning of a miniature air vehicle converging to a straight line path / S. Hota, D. Ghose // Proc. of the American control conference (St. Louis, MO, USA, June 2009). – P. 2397–2402.

10. Kaya, C.Y. Markov–Dubins path via optimal control theory / C.Y. Kaya // Comput. Optim. 2017. Appl. 68. – P. 719 – 747.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ МНОГОАГЕНТНОЙ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ

М.Г. Козлова, В.А. Лукьяненко³, О.О. Макаров, В.А. Матковский

Рассматриваются прикладные модели многоагентной маршрутизации с учетом специфики организации структуры сети, целей системы и локальных целей агентов. Выделяется класс задач многих коммивояжеров (*mTSP*) разного уровня иерархии (*HCmTSP*). Построение маршрутов *HCmTSP* согласовано с естественной кластеризацией сложной инфраструктурной сети. Приводится обзор задач, методов и алгоритмов, основанных на разных эвристиках. Выделяется иерархическая кластеризация сети. Показано, что в зависимости от логистических целей должен быть выбран различный тип кластеризации, согласованной с *mTSP*. Сравниваются результаты вычислительного эксперимента по типам кластеризации и маршрутам. Отдается предпочтение иерархической кластеризации, согласованной с иерархией маршрутов *HCmTSP*.

Ключевые слова: задача коммивояжера *TSP* и *mTSP*, иерархическая кластеризация, алгоритмы решения *mTSP*.

Введение

Актуальность темы связана с большим числом прикладных задач построения многоагентных маршрутов в сложно организованных сетях [1-3]. Например, из некоторого центра необходимо доставить товар в региональные центры, где они будут перегружены и доставлены потребителям за наименьшее время или с минимальной стоимостью. Здесь сочетаются задачи обхода кластеров (кластерная задача коммивояжера) и локальные задачи коммивояжеров на каждом кластере. Другие модели связаны с применением в задачах мониторинга инфраструктурных сетей беспилотных летательных аппаратов – дронов (БПЛА). Исходной сети ставится в соответствие более простая сеть облета и упрощается исходная задача многих коммивояжеров (Multiple Travelling Salesman Problem, *mTSP*).

Для исследования иерархических *mTSP* применяются современные подходы, основанные на точных и приближенных алгоритмах, с использованием эвристик, метаэвристик, генетических алгоритмов и нейросетевого подхода, интеллектуализированной обработки больших данных.

Разработки алгоритмов иерархической маршрутизации многих агентов в инфраструктурных сетях связывается с: 1) описанием алгоритмов

³ Выполнено при частичной поддержке гранта РФФИ № 20-58-S52006

иерархической кластеризации и их применением к задачам маршрутизации; 2) согласованием иерархической кластеризации с задачей построения маршрутов на кластерах; 3) построением алгоритмов иерархической маршрутизации, сочетающий обход кластеров и построение маршрутов типа коммивояжеров на кластерах.

1. Иерархическая кластеризация в задачах маршрутизации

Задачи коммивояжера (Travelling Salesman Problem, *TSP*) и многоагентная *mTSP* хорошо известны в литературе и являются *NP*-трудными [5]. Впервые для численного решения *TSP* был предложен алгоритм Данцига, Фалкерсона и Джонсона, где использовался метод ветвей и границ (МВГ). Было обнаружено, что среднее время вычисления слишком велико, чтобы МВГ можно было применять в реальных задачах *TSP*. Задача коммивояжера – это *NP*-трудная задача. Поэтому *TSP* решалась с помощью различных метаэвристик, таких как колонии муравьев АСО, имитация отжига *RS*, генетические алгоритмы *GA* и другие. Новые алгоритмы продолжают появляться, и их интересно использовать и различных обобщениях *mTSP*, например, в Multi Depot Multiple Traveling Salesman Problem (*MDmTSP*): несколько складов (депо) и множество агентов; каждый агент приписан к одному складу (депо).

Для нахождения аппроксимации глобального оптимума *mTSP*, используются эвристики. Из семейства популярных эволюционных алгоритмов наиболее широко используются для нахождения приближения к оптимальному маршруту:

- генетический алгоритм: набор векторов параметров оптимизируется с использованием операторы селекции, скрещивания и мутации;
- оптимизация роя частиц: генерируется много агентов нижнего уровня, которые перемещаются случайно, но найденный ими оптимум подкрепляется другими членами колонии;
- оптимизация муравьиной колонии: генерируется много агентов, которые сотрудничают друг с другом, общаются друг с другом и со своим окружением;
- табу-поиск: фаза локального поиска расширяется запретами, используются (табу) правила, позволяющие избежать ненужных позиционных тестов.

В работе, кроме стандартных эвристических алгоритмов, используются следующие алгоритмы:

- алгоритм ближайшего соседа: выбирается ближайший не посещаемый узел в качестве следующего узла маршрута (может быть далек от оптимального);
- попарный обмен ребрами: два ребра удаляются из маршрута и два новых ребра включены в маршрут, чтобы снизить общую стоимость.

Многоагентные TSP остается предметом текущих исследований, на TSP можно пробовать проверять новые различные эвристические стратегии. Существуют различные приложения в задачах с большим количеством вершин (узлов). Например, задача доставки заказов, формулировка которой мотивирована проблемой комплектования заказов на складах, где продукты одного и того же типа хранятся на разных складах или в разных местах на одном и том же складе. Кроме того, различные постановки задачи могут быть преобразованы в *TSP* с большим количеством вершин (узлов), например, проблема маршрутизации транспортных средств или проблема составления расписания работы магазинов. С другой стороны, для решения задач с большим числом вершин можно использовать различные методы кластеризации, основанные на прототипах, центрах, компонентах графа и плотностях. В некоторых источниках предложено решение *TSP* с помощью кластеров, например, в [6] предложен подход, названный *CTSP* (кластерная задача коммивояжера). Широко представлены исследования решения задачи *TSP* с использованием колонией муравьев, имитацией отжига и генетическими алгоритмами. Некоторые авторы считают, что наилучшие результаты были получены с помощью генетических алгоритмов, что, верно, для выделенного класса задач.

Представляет интерес решение *CTSP*, применяющее комбинацию эвристики в алгоритме *NEH* (предложен Nawaz M., Enscore E., Ham I. [7]).

Алгоритмы, основанные на кластеризации, более эффективны, чем генетические алгоритмы. Выбор алгоритмов кластеризации отвечает цели работы и поставленным задачам. От типа кластеризации зависит решение *mTSP* с одним или несколькими депо, особенно в случае иерархической структуры вершин и их специализации.

Прежде чем решать задачу *mTSP* на сети G с различной иерархической структурой вершин, рассмотрим типичные ситуации. Часть вершин являются складами (депо), а остальные – простыми вершинами. Пусть заданы вершины верхнего уровня и нижнего уровня. Например, из вершин доставляется ресурс в вершины, откуда он перераспределяется по остальным узлам, каким-то количеством агентов-коммивояжеров. При этом все узлы и их специфика могут быть заданы, требуется только распределить вершины между агентами для построения каждым из них замкнутых маршрутов *TSP* так, чтобы общий вес маршрутов был минимальным. Возможна задача синтеза иерархической структуры сети с поиском иерархии вершин, обеспечивающей наилучшее решение *mTSP*. Следующий вариант предполагает построение одного замкнутого маршрута по всем вершинам сети G ($D=0$) с помощью m агентов-коммивояжеров.

Реальные задачи приводят к различным постановкам, не укладывающимся в рассмотренные варианты. Может ставиться задача об определении количества различного типа коммивояжеров, например, большегрузные средства передвижения (СП) обеспечивают доставку грузов на узлы нижнего уровня, где они перегружаются на СП меньшей грузоподъемности и доставляются потребителям по кольцевым (или радиальным) маршрутам на выделенных узлах (кластерах).

Вариантам маршрутизации соответствуют схемы включения этапа кластеризации для снижения сложности решения $mTSP$ с учетом специфики вершин. В целом соответствующие алгоритмы являются эвристическими и требуют анализа их эффективности для конкретного варианта иерархической кластеризации $mTSP$ ($HCmTSP$) (рис. 1).

Алгоритм иерархической кластеризации для $MDmTSP$:

1. Задание выделенных вершин D (склады, депо).
2. Кластеризация узлов в непересекающиеся группы.
3. Расширение каждого кластера ближайшим элементом из депо.
4. Переход на вершины TSP для каждого кластера для определения локальных маршрутов для каждого агента.
5. Обход баз (складов, депо).

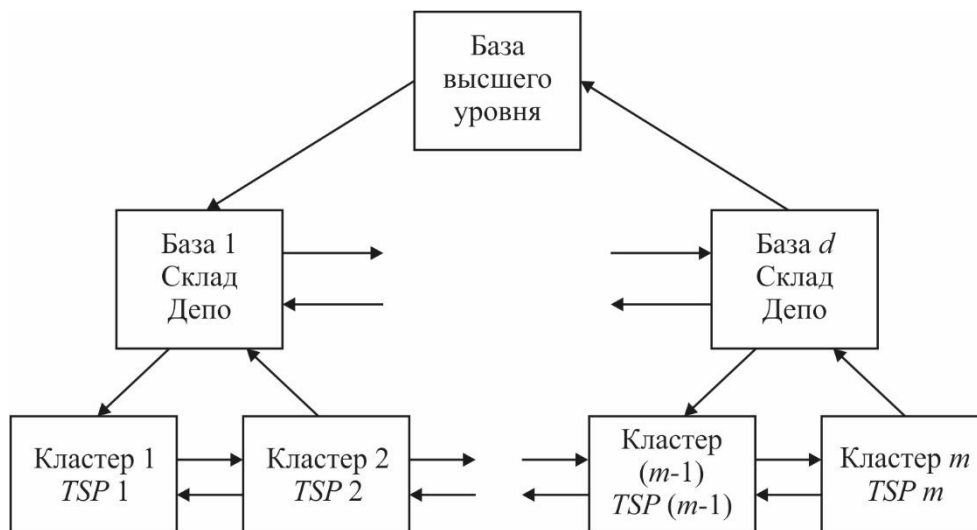


Рис. 1. Иерархическая $mTSP$ с m кластерами, d базами и базой высшего уровня

В случае вариантов TSP со многими депо, депо может быть закреплено заранее или расположено на любых узлах.

Чтобы справиться со сложностью задачи TSP , широко применяются метаэвристики. Однако, нужно отметить, что до сих пор не найдены методы или техники, которые обеспечивали бы нахождение оптимального решения за полиномиальное время. Современные тенденции в решении

проблем *TSP* включают в себя методы кластеризации и решение *TSP* отдельно на каждом кластере.

Чтобы понизить сложность решения задачи *TSP* в работе [8] обсуждаются различные методы, основанные на идеях и методах кластеризации, в них показаны этапы процесса кластеризации и обсуждаются некоторые важные концепции, связанные с данными о классе и характеристиками отбора и эволюции кластера. Методы кластеризации можно разделить на следующие группы: на основе расстояний, плотностей, моделей, на изображениях, спектрах и иерархиях, и методах, используемых в интеллектуальном анализе данных. Авторами [9] предложено использовать несколько алгоритмов кластеризации; в целом подход представляет собой автоматический алгоритм, обеспечивающий сильную глобальную сходимость к оптимальному решению. М.Н. Данильченко и А.Б. Муравник [2] предложили нейросетевой подход с использованием функционала Ляпунова.

Рассмотрим двухэтапный метод планирования маршрутов с кластеризацией вершин. На первом этапе вершины разбиваются на непересекающиеся кластеры. Для каждого кластера генерируется локальный оптимальный маршрут. На втором этапе эти локальные маршруты объединяются в глобальный маршрут. Затем глобальный маршрут уточняется с использованием некоторых стандартных эвристических методов. Различные города группируются в непересекающиеся группы, где группа содержит похожие узлы. Сходство двух узлов измеряется значением расстояния между соответствующими позициями в евклидовом пространстве. Чтобы объединить локальные маршруты в глобальный маршрут, оптимальный маршрут обхода кластеров и оптимальные ребра из соединения должны быть определены в отдельном модуле оптимизации. В задаче с несколькими коммивояжерами также используется метод кластеризации для определения набора узлов, соответствующих одному и тому же коммивояжеру. Каждый агент должен посетить города одного и того же кластера.

2. Реализация алгоритмов *mTSP* с использованием кластеризации

В разработке алгоритмов кластеризации сети для решения задачи *mTSP* использована библиотека Scikit-learn для Python, что позволяет проводить эксперименты для тестовых примеров из библиотеки TSPLIB. В результате проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что в зависимости от структуры сети, иерархичности задачи *mTSP*, наличия одного или нескольких депо, необходимо выбирать подходящий алгоритм кластеризации, согласованной с *mTSP*. В работе [1] по нахождению многоагентных маршрутов в чрезвычайных ситуациях условия для реальных данных Большой Ялты исходной городской инфраструктурной сети ставится в соответствие сеть в виде полного графа, для которого

расстояние между вершинами находится по прямой. Проводится согласованная с $mTSP$ кластеризация, а затем осуществляется проекция найденных маршрутов сети облета на реальную городскую сеть.

В данной работе рассмотрена сеть (более 1000 вершин) из библиотеки TSPLIB. Проведена кластеризация для 2, 3, 4, 5 агентов различными методами. Базовыми являются k -means и геометрическое распределение вершин, расположенных в круге по углу.

Выбор маршрутов на каждом кластере каждым агентом осуществляется с помощью жадных алгоритмов и уточнения с помощью локальных преобразований. Кластеры уточняются по результатам сравнения найденных маршрутов с помощью процедуры перебрасывания вершин из одного в другой кластер.

Вычислительный эксперимент подтверждает необходимость согласованной с иерархической структурой сети кластеризации с целью существенного снижения времени решения $mTSP$. В рассмотренных примерах время решения задачи для двух агентов в несколько раз превосходит время для 4 агентов. Таким образом, построение маршрута коммивояжера для сети большой размерности разумно использовать $mTSP$ и у каждого агента может быть своя стратегия поиска маршрута на локальном кластере (применение роевых, генетических алгоритмов и др.). Объединение локальных маршрутов в один общий является самостоятельной задачей, решаемой с помощью эвристик за разумное время.

Заключение. Для задач TSP с большим количеством узлов многоуровневая оптимизация превосходит одноуровневую оптимизацию. В рассмотренной многоуровневой оптимизации множество узлов разбивается на кластеры или на иерархию кластеров. Для каждого кластера выполняется отдельная локальная оптимизация TSP , а затем локальные маршруты объединяются в глобальный маршрут. Процесс иерархической кластеризации может быть совмещен с поиском маршрутов коммивояжеров, уточнение маршрута при добавлении вершины в кластер может не приводить к сильному изменению построенного ранее маршрута. В случае устойчивости эффективны методы реоптимизации (постоптимальный анализ). По результатам тестовых экспериментов предложенный метод превосходит метод одноуровневой оптимизации как для задач TSP , так и для задач $mTSP$. Можно сделать вывод, что в зависимости от наличия одного или многих депо, структуры сети необходимо выбирать соответствующую кластеризацию. Для реальных задач учет всей имеющейся информации позволит разработать эффективный алгоритм для конкретной задачи или класса задач.

Библиографический список

1. Germanchuk, M. S. and Lemtyuzhnikova, D. V. and Lukianenko, V. A. Metaheuristic Algorithms for Multiagent Routing Problems // Automation and Remote Control. – 2021. – 10 (82). – P. 1787-1801.
2. Данильченко М. Н., Муравник А. Б. Нейросетевой подход к построению маршрута в автоматизированной системе управления специального назначения // Научно-технические исследования в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 1. С. 58–66. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-1-58-66
3. Козлова М. Г., Лукьяненко В. А., Руденко Л. И., Германчук М. С. Использование технологий искусственного интеллекта в многоагентных задачах управления // Дистанционные образовательные технологии: сборник трудов VI Международной научно-практической конференции / отв. ред. В.Н. Таран. – Симферополь, ИТ «АРИАЛ», 2021. – С. 251-255.
4. Лукьяненко В. А., Германчук М. С., Макаров О. О. Специфика задач маршрутизации в условиях локальных преобразований сети // Математические методы распознавания образов: Тезисы докладов 20-й Всероссийской конференции с международным участием, г. Москва 2021 г. – М.: Российская академия наук, 2021. – С. 460-462.
5. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. – М.: МЦНМО, 2001. – 960 с.
6. Phienthrakul T. Clustering Evolutionary Computation for Solving Traveling Salesman Problem. International Journal of Advanced Computer Science and Information Technology. 2014; 3(3):243–262.
7. Nawaz M., Enscore E., Ham I. A heuristic algorithm for the m-Machine, n-Job flow-shop sequencing problem. Omega-International Journal of Management Science. 1983; 11:91–95.
8. Dutta S. and Bhattacharya S. A short review of clustering techniques: International Journal of Advanced Research in Management and Social Sciences, 2015;132–139.
9. Vijayalakshmi S., Jayanavithraa C., Ramya L., (2013) Gene Expression Data Analysis Using Automatic Spectral MEQPSO Clustering Algorithm. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. 2013; 2:1145–1148.

ПОСТРОЕНИЕ РЕДУЦИРОВАННЫХ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ С АФФИННЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

Д.В. Краснов

Для линейных одноканальных систем с аффинными возмущениями, в которых выходная переменная не измеряется, приведены условия существования и методы синтеза редуцированных наблюдателей состояния с кусочно-линейными корректирующими воздействиями. Данный подход не требует идентификации внешних возмущений и позволяет восстановить неизмеряемые переменные с любой заданной точностью.

Ключевые слова: линейные системы, возмущения, редуцированный наблюдатель состояния, кусочно-линейная коррекция.

Рассматриваются линейные одноканальные системы автоматического управления с аффинными возмущениями. Предполагается, что модель объекта представлена в треугольной (по составу переменных в каждом уравнении) форме «вход–выход». Цель управления – с помощью обратной связи обеспечить заданное поведение выходной переменной (поддержание заданного уровня или отслеживание заданного сигнала). В типовой ситуации предполагается, что все параметрические неопределенности и внешние возмущения являются согласованными, т.е. действуют по одному каналу с управлением, и имеется датчик выходной (регулируемой) переменной. Такие системы являются наблюдаемыми и управляемыми инвариантно по отношению к внешним возмущениям. Для них в рамках разных подходов [1–3] разработаны методы синтеза динамической обратной связи, включая построение полноразмерного наблюдателя состояния с неизвестным входом.

В реальных системах, как правило, возмущения не являются согласованными, что приводит к частичной потере наблюдаемости переменных состояния, без знания которых нельзя сформировать обратную связь. Классический подход состоит в расширении пространства состояний с помощью экзогенных динамических моделей, имитирующих внешние возмущения [1, 4]. Тогда с помощью наблюдателя повышенной размерности можно получить оценки и неизмеряемых переменных состояния, и внешних возмущений. Однако составление адекватной экзогенной модели не всегда возможно и сильно сужает класс допустимых возмущений. Для систем, где возмущения полагаются гладкими функциями времени, предложен универсальный подход, не требующий индивидуального оценивания возмущений [5]. Он состоит в переходе к координатному базису смешанных

переменных (линейных комбинаций переменных состояния, внешних воздействий и их производных) и канонической форме «вход–выход» с неопределенностями, действующими по входу. Такое представление сводит проблему синтеза следящей системы к применению известных методов с построением полноразмерного наблюдателя смешанных переменных по измерениям только выходной переменной (или ошибки слежения).

Заметим, что измерение именно выходной переменной является необходимым условием для реализации указанного универсального подхода. В данной работе рассматривается мало изученный в теории, но распространенный в практических приложениях случай, когда в системе с несогласованными, но гладкими возмущениями, комплект датчиков не полный и выходная (регулируемая) переменная по тем или иным причинам не может быть измерена [6]. Чтобы использовать преимущества такого подхода к построению инвариантной системы слежения, надо сначала восстановить выходную переменную. В данной работе для указанного класса линейных систем сформулированы условия существования физически реализуемых редуцированных наблюдателей выходных переменных. Задача рассматривается в узкой постановке, т.е. проблема дополнительной идентификации внешних возмущений не ставится и не решается. Тем не менее, методологической основой для данного исследования, являются способы оценивания внешних возмущений по их воздействию на объект управления, не требующие составления динамических моделей внешних возмущений. В данных наблюдателях используются кусочно-линейные корректирующие воздействия, которые обеспечивают заданную точность оценочных сигналов при выполнении определенных условий [5, 7, 8].

Для пояснения указанного метода вначале рассмотрим линейную систему второго порядка, представленную в треугольной форме «вход–выход»

$$\dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \eta_1(t), \quad \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \eta_2(t) + bu, \quad (1)$$

$$a_{12} \neq 0, b = \text{const} \neq 0, \quad (2)$$

где $x = (x_1, x_2)^T \in X \subset R^2$ – вектор состояния, X – открытая ограниченная область изменения переменных состояния в процессе регулирования, $x_1(t)$ – регулируемый выход, a_{ij}, b – известные константы, η_i – внешние возмущения, u – управление (вход), которое является известной функцией времени. Все внутренние и внешние сигналы в системе (1) полагаются ограниченными вместе со своими производными в процессе управления, в частности:

$$|\eta_i(t)| \leq H_i, |\dot{\eta}_i(t)| \leq \bar{H}_i, i=1,2, |x_i(t)| \leq X_i, |\dot{x}_i(t)| \leq \bar{X}_i, t \in [0, T], \quad (3)$$

где T – время регулирования, $X_i, \bar{X}_i, H_i, \bar{H}_i$ – известные константы.

Рассмотрим мотивирующие примеры – различные варианты измерений в системе (1) и условия физической реализуемости соответствующих наблюдателей переменных состояния и внешних возмущений.

Пример 1. Если в системе (1) обе переменные состояния $x_1(t), x_2(t)$ измеряются, то можно восстановить и оба внешних возмущения с помощью двух автономных наблюдателей первого порядка:

$$\dot{z}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + v_1, \quad \dot{z}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + bu + v_2, \quad (4)$$

где $z_i \in R$ – переменные состояния наблюдателя, $v_i \in R$ – его корректирующие воздействия, $i=1,2$. С учетом (1), (4) система относительно ошибок наблюдения $\varepsilon_i = x_i - z_i \in R$ примет следующий вид

$$\dot{\varepsilon}_i = \eta_i(t) - v_i, \quad i=1,2. \quad (5)$$

Синтез наблюдателя (4) заключается в выборе параметров кусочно-линейных корректирующих воздействий

$$v_i = m_i \text{sat}(l_i \varepsilon_i) = \begin{cases} m_i \text{sign}(\varepsilon_i), & |\varepsilon_i| > 1/l_i, \\ m_i l_i \varepsilon_i, & |\varepsilon_i| \leq 1/l_i, \end{cases} \quad m_i, l_i = \text{const} > 0, \quad (6)$$

стабилизирующих ошибки наблюдения и их производные

$$|\varepsilon_i(t)| \leq \delta_i \Rightarrow |\dot{\varepsilon}_i(t)| \leq \Delta_i \Rightarrow \eta_i(t) \approx v_i(t) \pm \Delta_i, \quad i=1,2, \quad t_0 < t \leq T. \quad (7)$$

Из (7) следует, что оценочными сигналами для внешних возмущений являются корректирующий воздействия наблюдателей. Учитывая, что вектор состояния измеряется, в системах (4), (5) установим начальные значения:

$$z_i(0) = x_i(0) \Rightarrow \varepsilon_i(0) = 0 \Leftrightarrow |\varepsilon_i(0)| \leq 1/l_i, \quad i=1,2.$$

Обеспечим $|\varepsilon_i(t)| \leq 1/l_i$ при $t \in [0, T]$ выбором амплитуд $m_i, i=1,2$ корректирующих воздействий (6) на основе неравенств, полученных с помощью второго метода Ляпунова на основе представления замкнутой системы (5)–(6) вне линейных зон, т.е. при $|\varepsilon_i| > 1/l_i$:

$$m_i > H_i \Rightarrow \varepsilon_i \dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_i (\eta_i - m_i \text{sign}(\varepsilon_i)) \leq |\varepsilon_i| (H_i - m_i) < 0, \quad i=1,2. \quad (8)$$

При выполнении условий (8) ошибки наблюдения не выйдут из линейных зон $|\varepsilon_i(t)| \leq 1/l_i$, где уравнения (5)–(6) и их производные принимают вид

$$\dot{\varepsilon}_i = \eta_i(t) - m_i l_i \varepsilon_i, \quad \ddot{\varepsilon}_i = \dot{\eta}_i(t) - m_i l_i \dot{\varepsilon}_i, \quad i=1,2.$$

Переменные состояния $\varepsilon_i(t), \dot{\varepsilon}_i(t)$ сойдутся в заданные области (7) за конечное время $t_0: 0 \leq t_0 \ll T$ при выполнении условий

$$\begin{aligned} l_i \geq H_i / (m_i \delta_i) &\Rightarrow \varepsilon_i \dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_i (\eta_i(t) - m_i l_i \varepsilon_i) \leq |\varepsilon_i| (H_i - m_i l_i |\varepsilon_i|) < 0; \\ l_i \geq \bar{H}_i / (m_i \Delta_i) &\Rightarrow \dot{\varepsilon}_i \ddot{\varepsilon}_i = \dot{\varepsilon}_i (\dot{\eta}_i(t) - m_i l_i \dot{\varepsilon}_i) \leq |\dot{\varepsilon}_i| (\bar{H}_i - m_i l_i |\dot{\varepsilon}_i|) < 0, \quad i=1,2. \end{aligned} \quad (9)$$

Выполнение условий (8)–(9) обеспечит решение поставленной задачи (7).

Пример 2. Рассмотрим варианты, когда в системе (1) измеряется только одна переменная состояния и в правой части дифференциального уравнения для измеряемой переменной внешнее возмущение отсутствует.

Если в системе (1)–(2) измеряется только выходная переменная $x_1(t)$ и $\eta_1(t) \equiv 0$, то тогда, аналогично (4), можно восстановить другую переменную состояния $x_2(t)$ с помощью редуцированного наблюдателя, построенного на основе первого уравнения системы (1) в виде

$$\dot{z}_1 = a_{11}x_1 + v_1, v_1 = m_1 \text{sat}(l_1 \varepsilon_1), \varepsilon_1 = x_1 - z_1, \dot{\varepsilon}_1 = a_{12}x_2 - v_1. \quad (10)$$

После анализа виртуальной системы

$$|\varepsilon_1| > 1/l_1 : \dot{\varepsilon}_1 = a_{12}x_2 - m_1 \text{sign}(\varepsilon_1);$$

$$|\varepsilon_1| \leq 1/l_1 : \dot{\varepsilon}_1 = a_{12}x_2 - m_1 l_1 \varepsilon_1, \ddot{\varepsilon}_1 = a_{12}\dot{x}_2 - m_1 l_1 \dot{\varepsilon}_1$$

получим неравенства для выбора параметров наблюдателя (10) аналогично (8)–(9) в виде

$$m_1 > |a_{12}|X_2, l_1 \geq \frac{|a_{12}|}{m_1} \max \left\{ \frac{X_2}{\delta_1}, \frac{\bar{X}_2}{\Delta_1} \right\}, \quad (11)$$

что обеспечивает $|\varepsilon_1(t)| \leq \delta_1 \Rightarrow |\dot{\varepsilon}_1(t)| = |a_{12}x_2 - v_1| \leq \Delta_1$ и, следовательно,

$$a_{12}x_2 \approx v_1 \pm \Delta_1 \Rightarrow x_2(t) \approx v_1 / a_{12}, t_0 < t \leq T. \quad (12)$$

Таким образом, методика оценивания внешних возмущений, представленная в первом случае, применена для восстановления неизмеряемой переменной состояния $x_2(t)$. Ее оценкой служит корректирующее воздействие редуцированного наблюдателя (10), построенного на основе дифференциального уравнения измеряемой переменной $x_1(t)$, на которое возмущение не действует. Заметим, что второе уравнение системы (2), которое зависит от возмущения, не использовалось в явном виде для решения задачи наблюдения, поэтому дополнительная идентификация $\eta_2(t) \neq 0$ не потребовалась. Основное ограничение данного подхода состоит в том, что на этапе проектирования надо получить оценки X_2, \bar{X}_2 (3), необходимые для настройки наблюдателя (10), с учетом конкретного закона управления и допустимой области начальных значений переменных состояния.

Следует отметить, что в данном случае стандартный редуцированный наблюдатель, который строится на основе дифференциального уравнения неизмеряемой переменной [9], в узкой постановке физически нереализуем, так как второе уравнение системы (1) находится под воздействием внешнего неконтролируемого возмущения.

Обратим внимание, что при измерениях $x_1(t)$ и $\eta_1(t) \equiv 0$ в системе (1) возмущение $\eta_2(t)$ действует по одну каналу с управлением u (т.е. является согласованным) и не сужает наблюдаемое пространство вектора состояния. Это означает, что с помощью указанной методики можно восстановить с

заданной точностью и переменную состояния $x_2(t)$, и возмущение $\eta_2(t) \neq 0$ без наличия его динамической модели, если использовать полноразмерный наблюдатель второго порядка

$$\dot{z}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}z_2 + v_1, \dot{z}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}z_2 + bu + v_2. \quad (13)$$

С учетом (1), (13) система относительно ошибок наблюдения $\varepsilon_i = x_i - z_i \in R$ принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= a_{12}\varepsilon_2 - v_1, v_1 = m_1 \text{sat}(l_1\varepsilon_1), m_i, l_i = \text{const} > 0, \\ \dot{\varepsilon}_2 &= a_{22}\varepsilon_2 + \eta_2(t) - v_2, v_2 = m_2 \text{sat}(l_2\varepsilon_2 / a_{12}). \end{aligned} \quad (14)$$

Выбором параметров коррекции в системе (14) последовательно, сверху вниз, обеспечивается стабилизация ошибок наблюдения и их производных:

$$\begin{aligned} |\varepsilon_1(t)| \leq \delta_1 &\Rightarrow |\dot{\varepsilon}_1(t)| = |a_{12}\varepsilon_2 - v_1| \leq \Delta_1 \Rightarrow \\ &\Rightarrow |\varepsilon_2(t)| \leq \delta_2 \Rightarrow |\dot{\varepsilon}_2(t)| = |a_{22}\varepsilon_2 + \eta_2 - v_2| \leq \Delta_2 \Rightarrow \\ &\Rightarrow x_2(t) \approx z_2(t) \pm \delta_2, \eta_2(t) \approx v_2(t) \pm (|a_{22}|\delta_2 + \Delta_2). \end{aligned} \quad (15)$$

Теперь рассмотрим ситуацию, когда измеряется только $x_2(t)$ и $\eta_2(t) \equiv 0$. Условием наблюдаемости регулируемой переменной $x_1(t)$ является требование $a_{21} \neq 0$. Тогда можно восстановить $x_1(t)$ с помощью корректирующего воздействия редуцированного наблюдателя, построенного на основе второго уравнения системы (1) в виде, аналогичном (11), а именно:

$$\dot{z}_2 = a_{22}x_2 + bu + v_2, v_2 = m_2 \text{sat}(l_2\varepsilon_2), \varepsilon_2 = x_2 - z_2, \dot{\varepsilon}_2 = a_{21}x_1 - v_2. \quad (16)$$

Выполнение условий, аналогичных (11)–(12), обеспечит $x_1(t) \approx v_2 / a_{21}$, $t_0 < t \leq T$. Кроме того, с помощью полноразмерного наблюдателя, аналогичного (14), можно восстановить и $x_1(t)$, и $\eta_1(t) \neq 0$.

Пример 3. Если в системе (1) измеряется только $x_1(t)$, но $\eta_1(t) \neq 0$, то в узкой постановке, т.е. без ввода динамической модели $\eta_1(t)$, решить задачу оценивания по отдельности переменной $x_2(t)$ и внешних возмущений нельзя. И, наоборот, если только $x_2(t)$ измеряется, но $\eta_2(t) \neq 0$, то даже при $a_{21} \neq 0$ в узкой постановке решить задачу оценивания по отдельности и $x_1(t)$, и $\eta_1(t) \neq 0$ не представляется возможным.

Основной результат. Рассмотрим аффинную систему произвольного порядка, представимую в треугольной форме «вход–выход»

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= a_{i1}x_1 + \dots + a_{i,i+1}x_{i+1} + \eta_i(x_1, x_2, \dots, x_i, t), i = \overline{1, n-1}; \\ \dot{x}_n &= a_{n1}x_1 + \dots + a_{nn}x_n + \eta_n(x, t) + bu, \end{aligned} \quad (17)$$

где $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in X \subset R^n$ – вектор состояния, $x_1(t) \in R$ – регулируемый выход, $u \in R$ – управление, a_{ij}, b – известные константы; η_i содержат все неопределенности модели объекта и внешние возмущения, в некоторых

уравнениях системы (1) эти слагаемые отсутствуют. Выполнение условий

$$a_{i,i+1} \neq 0, i = \overline{1, n-1}; b \neq 0 \quad (18)$$

означает, что при отсутствии возмущений система (17) наблюдаема относительно выхода, а выход управляем относительно входа. В процессе управления все внутренние и внешние сигналы ограничены аналогично (3).

В узкой постановке, когда идентификация неизвестных параметров и построение генераторов внешних возмущений не предусмотрены или не возможны, имеются два варианта синтеза обратной связи, обеспечивающей отслеживание выходной переменной $x_1(t)$ заданного сигнала $g(t)$. Первый вариант [5]: при выполнении условий $\eta_i \in C^{n-i}, i = \overline{1, n-1}$ и $g(t) \in C^n$ система (17) представима в каноническом базисе смешанных переменных, для оценивания которых достаточно измерений $x_1(t)$ и $g(t)$, при этом с помощью динамической обратной связи можно обеспечить $\lim_{t \rightarrow \infty} x_1(t) = g(t)$.

Второй вариант [10]: если функции $\eta_i(t), \dot{g}(t)$ не являются гладкими, то при измерении $x_1(t), \dots, x_n(t)$ и $g(t)$ с помощью статической обратной связи можно обеспечить заданную точность ошибки слежения. При неполном комплекте датчиков возможность оценивания переменных состояния, необходимых для синтеза обратной связи, зависит от структуры наблюдаемости системы (17) и отсутствия возмущений $\eta_j(t) \equiv 0$ в конкретных j -х уравнениях.

Пусть для системы (17)–(18) применяется первый вариант синтеза обратной связи, но при этом регулируемая переменная $x_1(t)$ не измеряется. Сформулируем условия ее наблюдаемости в узкой постановке независимо от внешних возмущений, опираясь на мотивирующие примеры 2 и 3.

Лемма. Если в системе (17)–(18) найдется i -е уравнение, $i = 2, \dots, n$, такое что: 1) $\eta_i(t) \equiv 0, a_{i1} \neq 0$; 2) $x_{i+1}(t)$ измеряется ($x_{n+1}(t) \equiv 0$); 3) $x_i(t)$ измеряется или наблюдается независимо от возмущений; 4) или $a_{i2} = 0, \dots, a_{i,i-1} = 0$, или $x_2(t), \dots, x_{i-1}(t)$ измеряются, или наблюдаются независимо от возмущений, то тогда для оценивания $x_1(t)$ можно построить физически реализуемый редуцированный наблюдатель состояния.

Условия, сформулированные в лемме, продиктованы треугольным видом рассматриваемой системы (17)–(18). В самом простом случае, когда в i -м уравнении выполняются первые два условия леммы, $x_i(t)$ измеряется, а также измеряются переменные $x_2(t), \dots, x_{i-1}(t)$ (или $a_{i2} = 0, \dots, a_{i,i-1} = 0$), то тогда оценку $x_1(t)$ можно получить с помощью корректирующего воздействия наблюдателя первого порядка, построенного на основе i -го уравнения системы (17) аналогично (16):

$$\begin{aligned}\dot{z}_i &= a_{i2}x_2 + \dots + a_{i,i+1}x_{i+1} + v_i + [bu, \text{ если } i = n], \\ \varepsilon_i &= x_i - z_i, \dot{\varepsilon}_i = a_{i1}x_1 - v_i, v_i = m_i \text{sat}(l_i \varepsilon_i), m_i, l_i = \text{const} > 0, \\ |\varepsilon_i(t)| \leq \delta_i &\Rightarrow |\dot{\varepsilon}_i(t)| = |a_{i1}x_1 - v_i| \leq \Delta_i \Rightarrow x_1(t) \approx v_i / a_{i1}, t_0 < t \leq T.\end{aligned}$$

Условия построения физически реализуемых наблюдателей для неизмеряемых переменных, требуемых для восстановления $x_1(t)$, аналогичны сформулированным в лемме. Например, если в системе (18)–(19) $x_2(t)$ измеряется, то при выполнении условий $\eta_j(t) \equiv 0, a_{j1} = 0, j = 2, \dots, k, k \leq i - 1$ на основе j -х уравнений можно построить физически реализуемый наблюдатель для оценивания $x_3(t), \dots, x_{k+1}(t)$ аналогично (13)–(15) и т.п.

Если условия леммы выполнены и оценка $x_1(t)$ может быть получена, то тогда для второго варианта синтеза системы слежения условия построения физически реализуемых наблюдателей для остальных неизмеряемых переменных относительно измеряемых (наблюдаемых) переменных проверяются аналогично. В частности, если $\eta_1(t) \equiv 0$, то тогда имеется возможность оценивания $x_2(t)$; если при этом $\eta_2(t) \equiv 0$, то и $x_3(t)$ и т.д.

В качестве примера рассмотрим две системы вида (18)–(19), которые описывают уравнения движений однозвенного манипулятора [11] при жестком типе сочленения с валом двигателя постоянного тока

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = \bar{c}_{21} \sin x_1 - \bar{c}_{22}x_2 + \bar{c}_{23}x_3 + \eta(t), \dot{x}_3 = -\bar{c}_{32}x_2 - \bar{c}_{33}x_3 + bu \quad (19)$$

и при эластичном типе сочленения

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2, \dot{x}_2 = \bar{a}_{21}(x_3 - x_1) - \bar{a}_{22} \sin x_1 + \eta(t), \\ \dot{x}_3 &= x_4, \dot{x}_4 = -a_{43}(x_3 - x_1) - a_{44}x_4 + a_{45}x_5, \\ \dot{x}_5 &= -\bar{a}_{54}x_4 - \bar{a}_{55}x_5 + bu,\end{aligned} \quad (20)$$

черта сверху означает, что данный параметр точно не известен, $\eta(t) \neq 0$.

В системе (19) условия леммы не выполнены. Если регулируемая переменная $x_1(t)$ не измеряется, то в узкой постановке нельзя получить ее оценку по измерениям $x_2(t), x_3(t)$. Поэтому для первого варианта синтеза системы слежения требуется датчик $x_1(t)$. Для второго варианта синтеза следящей системы минимальный набор – два датчика $x_1(t), x_3(t)$, так как на основе первого уравнения системы (19) можно построить редуцированный наблюдатель для оценивания $x_2(t)$.

В системе (20) условия леммы выполнены при $i = 4$ и измерениях $x_3(t), x_4(t), x_5(t)$, тогда наблюдатель первого порядка, построенный на основе четвертого уравнения системы (20), даст оценку $x_1(t)$. Минимальный набор для оценивания $x_1(t)$ – датчики $x_3(t), x_5(t)$, тогда наблюдатель второго порядка, построенный на основе третьего и четвертого уравнений системы

(20), даст оценки и $x_4(t)$, и $x_1(t)$ [12–13]. Измерения $x_3(t)$, $x_5(t)$ являются минимальным набором при отсутствии датчика $x_1(t)$ и для второго варианта синтеза, так как на основе первого уравнения системы (20) можно построить редуцированный наблюдатель для оценивания $x_2(t)$. Общий порядок наблюдателя при этом равен трем. Если $x_1(t)$ измеряется, то при дополнительных измерениях $x_3(t)$ с помощью наблюдателя третьего порядка можно получить оценки остальных переменных инвариантно к возмущениям.

Моделирование замкнутых систем (19), (20) с редуцированными наблюдателями подтвердило их работоспособность [5, 12–13].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-01-00363А).

Библиографический список

1. Никифоров, В.О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений / В.О. Никифоров. – СПб.: Наука, 2003. – 282 с.
2. Уткин, В.А. Задача слежения в линейных системах с параметрическими неопределенностями при неустойчивой нулевой динамике / В.А. Уткин, А.В. Уткин // Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 9. – С. 62–81.
3. Краснова, С.А. Анализ и синтез минимально-фазовых нелинейных SISO систем при действии внешних несогласованных возмущений / С.А. Краснова, А.В. Уткин // Проблемы управления. – 2014. – №6. С. – 22–30.
4. Уонем, У.М. Линейные многомерные системы. Геометрический подход / У.М. Уонем. – М.: Наука, 1980. – 375 с.
5. Краснов, Д.В. Синтез многофункциональной системы слежения в условиях неопределенности / Д.В. Краснов, А.В. Уткин // Управление большими системами. – 2017. – Вып. 69. – С. 29–49.
6. Бусурин, В.И. Особенности модульного построения систем контроля и диагностики инерциальных систем управления / В.И. Бусурин, В.М. Медведев, А.С. Карабицкий // Труды МАИ. – 2017. – № 92. – С. 19.
7. Краснова, С.А. Оценивание производных внешних возмущений на основе виртуальных динамических моделей / С.А. Краснова // Управление большими системами. – 2018. – Вып. 76. – С. 6–25.
8. Кокунько, Ю.Г. Каскадный синтез дифференциаторов с кусочно-линейными корректирующими воздействиями / Ю.Г. Кокунько, С.А. Краснова, В.А. Уткин // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 7. – С. 37–68.
9. Luenberger, D.V. Observers of multivariable systems / D. V. Luenberger // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1966. – Vol. 11, No. 2. – P. 190–197.
10. Антипов, А.С. Синтез инвариантных нелинейных одноканальных систем слежения с сигмоидальными обратными связями с обеспечением заданной точности слежения / А.С. Антипов, С.А. Краснова, В.А. Уткин // Автоматика и телемеханика. – 2022. – № 1. – С. 40–66.

11. Spong, M. Modeling and control of elastic joint robots / M. Spong // ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement. – 1987. – Vol. 109. – P. 310–319.
12. Краснов, Д.В. Синтез двухконтурного наблюдателя в задаче управления однозвенным манипулятором в условиях неопределенности / Д.В. Краснов, А.С. Антипов // Проблемы управления. – 2021. – № 4. – С. 23–33.
13. Антипов, А.С. Синтез системы слежения для однозвенного бездатчикового манипулятора при воздействии негладких возмущений / А.С. Антипов, Д.В. Краснов // Проблемы управления. – 2022. – № 3. – С. 3–15.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАКЕТА ПСЕВДОСПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ

С.С. Лысов

В статье предлагается способ реализации радионавигационной замкнутой системы на основе расположенных в зоне посадки наземных маяков, осуществляющих определение местоположение объекта по принципу псевдоспутниковой системы навигации. Рассматриваемая система планируется к испытанию в составе макета-демонстратора возвращаемой ракеты-носителя в качестве одной из систем навигации. Описан математический аппарат для корректировки измеренных данных. Представлены математическая модель и результат работы этой системы. Результаты моделирования послужат основой для проведения натурального эксперимента по реализации макета псевдоспутниковой системы.

Ключевые слова: возвращаемая ракета-носитель, макет, псевдоспутниковая система, радар, радионавигация.

Одноступенчатые многоразовые ракеты-носители (РН) могут стать итогом развития околоземной космонавтики [1]. Как и в привычной авиации, посадка является завершающим и наиболее сложным этапом полета РН, на который приходится основная доля происшествий [2, 3]. Для успешного выполнения посадки космодрома планируется оборудовать специальными системами, наиболее совершенными из которых являются радиомаячные (инструментальные) системы посадки, позволяющие выполнить заход на посадку и посадку [4-7].

Основным средством навигационного обеспечения на всех этапах полета РН, включая заход на взлет и посадку, станут спутниковые системы навигации (ССН). «Однако ССН присущ ряд существенных недостатков (низкая помехоустойчивость, влияние геометрического фактора, возможные сбои в работе бортовых приемников, ухудшение точности позиционирования при ионосферных возмущениях и пр.)» [8], что снижает эффективность их применения для обеспечения этапа посадки. Кроме этого, потребители предъявляют весьма высокие требования к характеристикам первичного навигационно-временного поля ССН по целостности, доступности, функциональной готовности [9, 10]. Под первичным НВП ГЛОНАСС в дальнейшем будем понимать поле, создаваемое сигналами навигационных спутников (НС), перемещающихся по заданным орбитам.

Для улучшения характеристик первичного навигационно-временного поля ССН в интересах гражданских потребителей разработаны различные функциональные дополнения наземного и спутникового базирования. В их

число входят дифференциальные подсистемы (широкозонные, региональные и локальные) и псевдоспутники – наземные передатчики, установленные в точках с известными координатами и излучающие сигналы в формате ССН [10-12].

Применение дифференциальных подсистем в труднодоступных и малоосвоенных регионах сталкивается с целым рядом проблем, поскольку для их эффективной работы необходима достаточно обширная сеть наземных контрольных станций и наличие каналов передачи данных потребителям. Поэтому для повышения точности ССН именно в зонах удаленных аэродромов с целью обеспечения категорированной посадки ВС в качестве функционального дополнения используются псевдоспутники (ПС) как одиночные, так и образующие сеть. При этом сигналами ПС и навигационных спутников в ограниченной условиями распространения радиосигналов ПС зоне пространства (как правило, в зоне аэродрома) создается интегрированное навигационно-временное поле (НВП) ССН. Исследования по использованию ПС в качестве средства повышения точности ССН проводили авторы, такие как А.А. Аполлонов, В.А. Борсоев, А.Н. Пронькин, К.К. Веремеенко, В.И. Бабуров, Н.В. Васильева, Н.В. Иванцевич, Скрыпник О.Н, Н. Stewart Cobb, Jinling Wang, О.Р. Арефьев и др.

В качестве аналога РН в макете ПС-системы по заданному условию выступает беспилотный летательный аппарат (БПЛА). Использовать в макете тот же метод определения местоположения, что используют спутниковая или псевдоспутниковая навигации, невозможно в силу абсолютно несопоставимых масштабов. ПС-система может обеспечивать навигацию РН в радиусе до 50 км [16]. На таких масштабах сигналу времени требуется до 167 мкс для того, чтобы достичь потребителя. Масштаб макета ПС-системы ограничен 10 м, тогда сигналу времени для достижения потребителя требуется до 33 нс, что более чем в 5 тысяч раз меньше. Более того, необходимое оборудование достаточно дорогостоящее [19]. Исходя из этого было принято решение в качестве аппаратного обеспечения выбрать доплеровский радар для измерения скорости [17].

Эффект Доплера или доплеровский сдвиг – это изменение частоты волны по отношению к наблюдателю, который движется относительно источника волны [18]. Для волн, которые распространяются вне среды, таких как электромагнитные волны, необходимо учитывать только относительную разницу в скорости между наблюдателем и источником.

Для построения математической модели макета псевдоспутниковой системы на основе радаров можно придерживаться следующих принципов:

- 1) при движении в направлении от приемника или к нему объект излучает радиосигнал с заданной частотой. Следовательно, стоящая

неподвижно антенна приемного устройства принимает излучаемый сигнал с частотой, смещенной на частоту Доплера;

2) скорость движения объекта вычисляется по формуле $\Delta f_D = \pm f_0 \frac{2V \cdot \cos \alpha}{c}$ [19];

3) частоту принимаемого сигнала можно вычислить, применяя быстрое преобразование Фурье и иные методы цифровой обработки сигналов (рис. 1) [20].

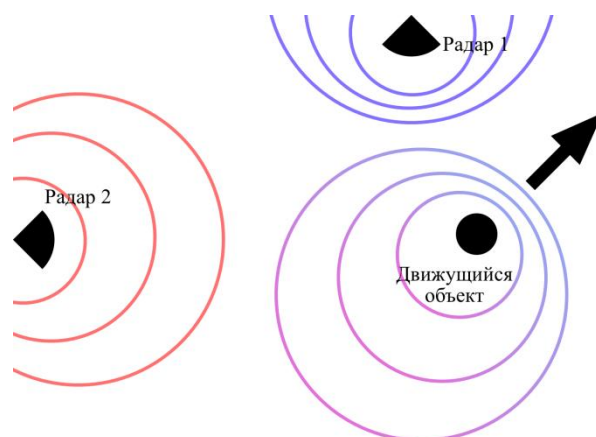


Рис. 1. Двумерная схема макета ПС-системы

С помощью радаров, каждый из которых направлен ортогонально своей оси координат, с применением математических принципов можно однозначно определить траекторию движения БПЛА.

Доплеровский радар измеряет скорость движения объекта. Для макета был выбран радар 24 ГГц DM-19 90-00005, обладающий следующими характеристиками:

- диапазон рабочих частот: 24–24,25 ГГц;
- расстояние обнаружения: 0–15 м для людей, 0–30 м для автомобилей;
- диапазон скорости: 1–300 км/ч;
- погрешность в точности: ± 1 км/ч;
- ширина диаграммы направленности по осям: 36° и 60° соотв.;
- максимальная эквивалентная изотропная излучаемая мощность (EIRP): 17 дБм;
- фазовый шум: 100 дБц/Гц для полосы частот 1 МГц;
- эквивалентный шум: 9 дБ в двух боковых полосах;
- степень дисбаланса фазы приема IQ: $< 5^\circ$;
- эквивалентный дисбаланс мощности IQ: $< 1,5$ дБ;
- эквивалентное максимальное усиление напряжения: 45 дБ;
- 5В одиночный источник питания, максимальный ток: 70 мА;

- микропроцессор с ARM Cortex M4/M3 series;
- размер: 25*25 мм.

Исходя из описанных технических характеристик, к модели можно применить следующие математические принципы:

1) в математическую модель необходимо внести погрешности измерений. Так как радар выводит сигнал о скорости 10 раз в секунду, ± 1 км/ч погрешности из характеристик можно конвертировать в $\mu = 0$ м/с, $\sigma = 0,056$ м/с.

2) Радар – прибор для измерения скорости движения объекта. Координата из графика изменения скорости вычисляется через интегрирование. В случае дискретного координатного пространства интегрирование можно заменить суммой ряда, каждый последующий член которого суммируется с результатом суммы всех его предыдущих дискрет.

3) Так как БПЛА движется в общем случае неортогонально выбранным осям координат и не строго по оси, на которой расположен соответствующий радар, в данные о скоростях, снятые с радаров, необходимо внести поправки (рис. 2).



Рис. 2. Поправка к вычислению скорости с помощью доплеровского радара

Схема макета ПС-системы с доплеровскими радарными в двумерном пространстве общем случае изображена на рис. 3.

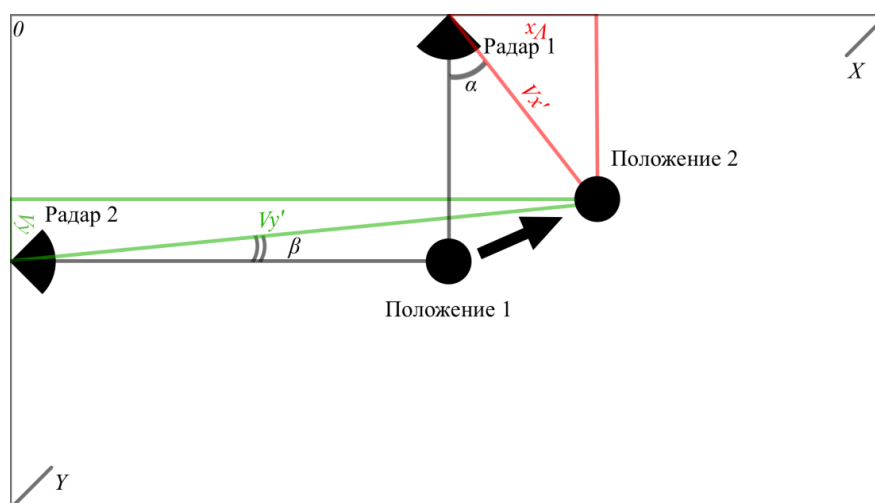


Рис. 3. Схема макета ПС-системы на доплеровских радарных

Таким образом, скорость движения БПЛА в трехмерном пространстве с поправкой на текущее положение вычисляется по формулам:

$$v_x = v'_x \cdot \cos\left(\arctg \frac{v'_y}{v'_x}\right) \cdot \cos\left(\arctg \frac{v'_z}{v'_x}\right);$$

$$v_y = v'_y \cdot \cos\left(\arctg \frac{v'_x}{v'_y}\right) \cdot \cos\left(\arctg \frac{v'_z}{v'_y}\right);$$

$$v_z = v'_z \cdot \cos\left(\arctg \frac{v'_x}{v'_z}\right) \cdot \cos\left(\arctg \frac{v'_y}{v'_z}\right),$$

где v_i – истинная скорость БПЛА в проекции на ось i ; v'_i – измеренная скорость БПЛА радаром оси i .

Для апробации работы математической модели была взята реальная траектория взлета и посадки БПЛА, над которой была проведена процедура 10-кратной децимации для уменьшения числа точек. Так как доплеровский радар дает информацию о скорости движения объекта, данную траекторию, для чистоты проведения эксперимента необходимо разложить на функции зависимости ортогональных координат от времени и взять производные. Соответствующие графики изменения координат и скоростей находятся на рис. 4. Измеренная и восстановленная траектории движения БПЛА находятся на рис. 5.

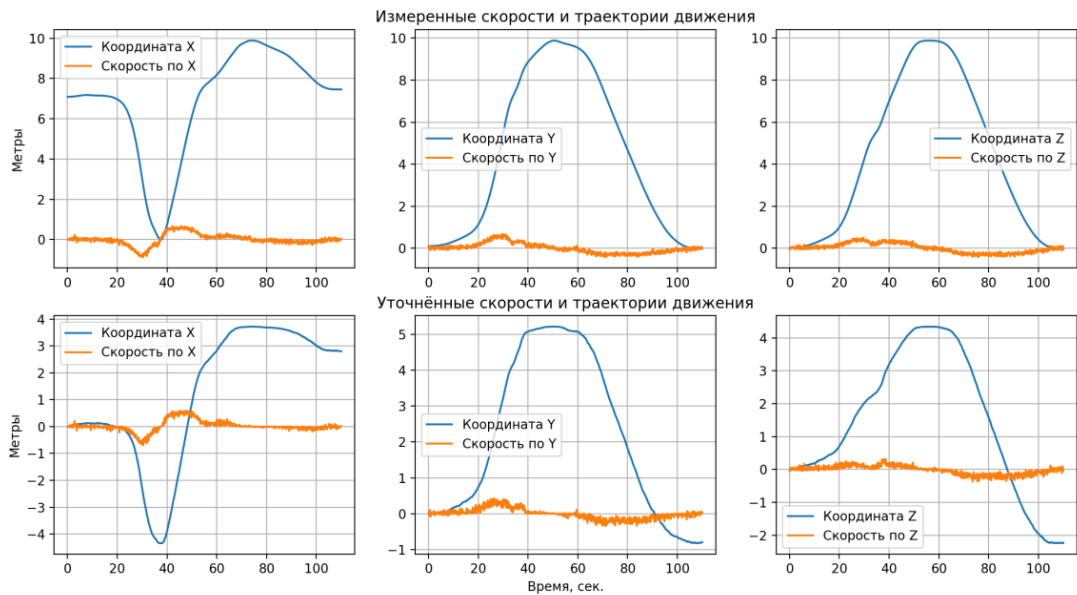


Рис. 4. Графики изменения координат и скоростей БПЛА

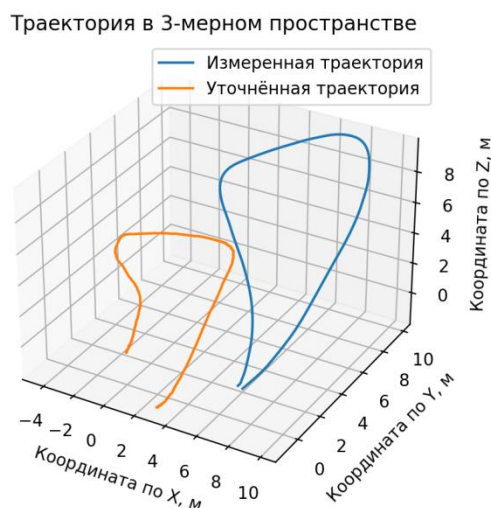


Рис. 5. Измеренная и восстановленная траектории движения БПЛА

Заключение. С помощью трех радаров, направленных ортогонально друг другу, и имея информацию о начальной точке движения можно однозначно определить местоположение БПЛА в любой момент времени при условии постоянного нахождения БПЛА в зоне пересечения диаграмм направленности радаров.

Дальнейшая работа по теме будет заключаться в натурном построении макета обособленной ПС-системы и построении действующей ПС-системы для обеспечения точностных характеристик взлета/посадки РН.

Библиографический список

1. Фишман, Р. От простого к сложному. Почему построить одноступенчатую ракету сложнее, чем многоступенчатую, и почему время сделать это уже пришло. / Р. Фишман // Популярная механика. – 2017. – Вып. 4. – № 4 (174). – С. 38–42.
2. Осипов, Ю. В. Требования к средствам и программам обучения операторов БПЛА в беспилотных авиационных системах // Вооружение. Политика. Конверсия. – М.: «Воентехлит», № 3, 2011, С. 99.
3. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide O 1959–2016 [Электронный ресурс], – Режим доступа: http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/company/about_bca/pdf/statsum.pdf свободный.
4. Скрыпник, О.Н. Радионавигационные системы воздушных судов: учебник / О.Н. Скрыпник. – М.: Инфра-М, 2014. – 348 с.
5. Сосновский, А.А. Авиационная радионавигация. Справочник. / А.А. Сосновский, И.А. Хаймович – М.: Транспорт, 1980. – 264 с.

6. Сосновский, А.А., Радиомаячные системы посадки самолетов. / А.А. Сосновский, И.А. Хаймович, Е.И. Шолупов – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
7. Беляевский, Л.С. Основы радионавигации: Учеб. для вузов 2-е изд., перераб. и доп./ Л.С. Беляевский, В.С. Новиков, П.В. Олянюк // Под ред. Л.С. Беляевского. М.: Транспорт, 1992. – 288 с.
8. Скрыпник, О.Н. Межсамолетная навигация при управлении воздушным движением: дис... д-ра. тех. наук – 05.22.13 /Скрыпник Олег Николаевич. – М.: МГТУ ГА, 2010, 313 с.
9. Радионавигационный план Российской Федерации. – М.: Минпромторг России, 2011. – 95 с.
10. Doc 9849 ИКАО. AN/457 Руководство по глобальной навигационной спутниковой системе (GNSS). – 2-ое изд. – 2013.
11. Инструкция по использованию глобальной навигационной спутниковой системы в гражданской авиации [Электронный ресурс], – Режим доступа: https://www.mintrans.ru/documents/detail.php?ELEMENT_ID=17850
12. Аполлонов, А.А. Улучшение точностных и надежностных характеристик аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем в высоких широтах / А.А. Аполлонов// Научно-практический рецензируемый журнал «Научный вестник МГТУ ГА». – М.: МГТУ ГА № 158, 2010, С.91-96.
13. Пронькин, А.Н. Интегрированная навигационная система БПЛА: структура и исследование характеристик / А.Н. Пронькин, И.М. Кузнецов, К.К. Веремеенко // Труды МАИ – 2010 - № 41 <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=23811>
14. Михайлов, С. Анализ направлений и состояния разработок функциональных дополнений к спутниковым радионавигационным системам / С. Михайлов, В. Кульнев // Беспроводные технологии. — 2006. — №3'2006. — С. 61-69.
15. Скрыпник, О.Н. Методика построения и анализ полей точности ГЛОНАСС в заданной зоне воздушного пространства / О.Н. Скрыпник, Р.О. Арефьев, Н.Г. Астраханцева // Научный вестник МГТУ ГА. — 2015. — №221. — С. 43-50.
16. Арефьев, Р.О. Методы повышения точности ГЛОНАСС в зоне аэродрома путем оптимизации размещения сети псевдоспутников: диссертация канд. техн. наук / Р.О. Арефьев. — М., 2017. — 162 с.
17. ОКР «Создание высокоточных средств позиционирования на основе псевдоспутников глобальных навигационных спутниковых систем», шифр «Псевдоспутник» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tenmon.ru/9/0173100009517000177.html> свободный.
18. Pulse-Doppler radar handouts from Introduction to Principles and Applications of Radar course at University of Iowa [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://user.engineering.uiowa.edu/~ece195/2006/docs/Doppler.pdf> свободный.
19. Giordano, N. College Physics: Reasoning and Relationships. // N. Giordano. — 2009. Cengage Learning, 2009. — P. 421—424.

20. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие / А.Б. Сергиенко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.

СИСТЕМА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОДНОМЕРНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Т.А. Макаровских, М.С.А. Аботалев

В статье описывается программное обеспечение, позволяющее построить прогноз для выбранного пользователем периода с использованием классических моделей, а также алгоритма идентификации параметров квазилинейного рекуррентного соотношения. Для достижения этой цели рассматривается три программных модуля: (1) TS-system, в основе которой лежит модуль Epidemic.TA (обновленная версия Epidemic.Network), позволяющий построить прогнозы для одномерного временного ряда с использованием регрессионных моделей, модели SIR и нейросетевой модели NNAR; (2) Модуль DL-system, использующий методы глубокого обучения для построения прогнозов для одномерного временного ряда; (3) Модуль GLDM, использующий методы идентификации параметров квазилинейного рекуррентного соотношения. Все модули реализованы на языках R (модуль Epidemic.TA, Epidemic.Network), Python (модуль DL-system).

Ключевые слова: прогнозирование временных рядов, алгоритм, статистические методы, методы глубокого обучения, система прогнозирования.

Анализ временных рядов и прогнозирование в настоящее время являются одной из широко исследуемых областей. Данные подходы используются как при анализе и моделировании экономических процессов, транспортных систем [1], так и для исследования провещцов, происходящих в промышленных системах [2], при анализе климатических процессов и прогнозировании погодных явлений [1], для прогнозирования состояния сельскохозяйственных угодий [3] и др.

В статье рассматривается созданное программное обеспечение, позволяющее построить прогноз для выбранного пользователем периода с использованием любой из рассмотренных выше моделей. Для достижения этой цели было разработано три программных модуля:

- Модуль TS-system, в основе которой лежит модуль Epidemic.TA (обновленная версия – модуль Epidemic.Network), позволяющий построить прогнозы для одномерного временного ряда с использованием регрессионных моделей, модели SIR и нейросетевой модели NNAR [4] (реализован с помощью языка R);

- Модуль DL-system, использующий методы глубокого обучения для построения прогнозов для одномерного временного ряда [5] (реализован на Python);

- Модуль GLDM, использующий методы идентификации параметров квазидифференциального рекуррентного соотношения [6] (реализован на C++ (параллельная версия) и Python (последовательная версия)).

Разработанный программный модуль работает в соответствии со следующим алгоритмом.

Алгоритм прогнозирования

Шаг 1. Загрузить вектор данных и инициализировать глобальные переменные.

Шаг 2. Разделить данные на обучающие и тестирующие.

Шаг 3. Преобразование временных рядов в стационарные и контролируемые.

Шаг 4. Последовательно запустить модели глубокого обучения с помощью системы DL-System.

Шаг 5. Запустить модели временных рядов и модель нейронной сети (NNAR) с помощью модуля TS-system и объединить их с помощью оптимизатора.

Шаг 6. Рассчитать точность обучающих данных (ошибки ME, MAE, RMSE, MPE, MAPE, MASE), автокорреляционную функцию (ACF).

Шаг 7. Рассчитать точность тестовых данных (MAPE) и получить сводные таблицы для прогнозирования с использованием каждой модели.

Шаг 8. Выбрать лучшую модель для прогнозирования с наименьшей ошибкой MAPE.

Модуль Epidemic.TA для прогнозирования одномерных временных рядов. Своим названием модуль обязан пандемии Covid-19, на данных которой было проведено его тестирование. Целью при разработке данной системы было создание алгоритма, позволяющего по имеющимся исходным данным о распространении коронавирусной инфекции в определенном регионе за заданный период времени определить наилучшую модель для составления прогноза на заданный пользователем период.

Алгоритм, заложенный в основу системы, анализирует прогнозы на основе моделей временных рядов (ARIMA, линейная модель Холта, BATS и TBATS) и модели нейронных сетей (NNAR) и выбирает модель, которая дает прогноз с минимальной средней абсолютной ошибкой в процентах (MAPE). В статье [7] описана программа на языке R, позволяющая получать прогноз с использованием описанных выше моделей, либо с последовательным использованием нескольких из них с установкой приоритетов весов для временных рядов (Рис.3). Критерием для выбора лучшей модели является минимальная ошибка MAPE.

На рис. 1 представлена схема работы модулей DL-System и TS-system с установкой приоритетов для моделей регрессионного анализа.

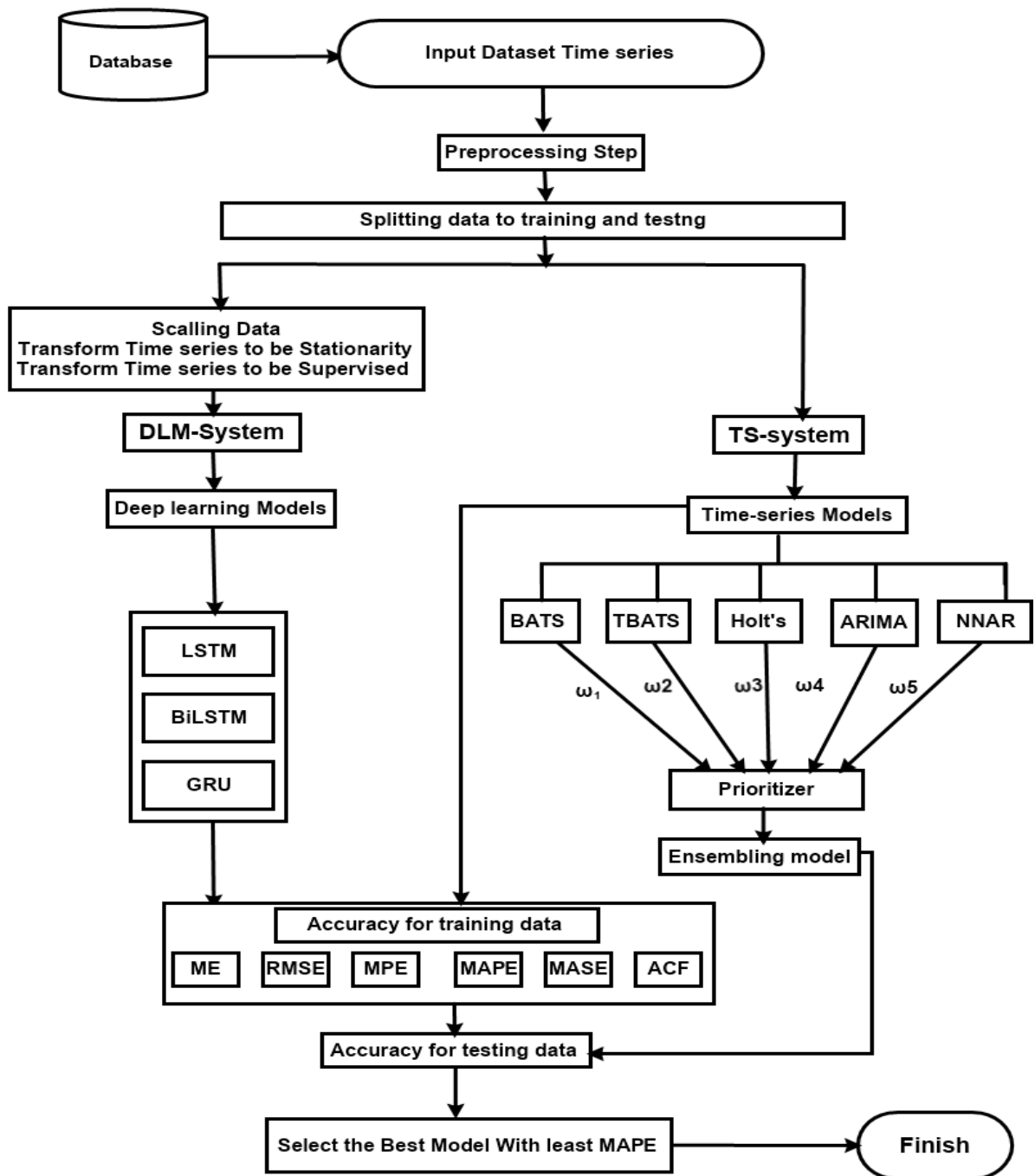


Рис. 1. Структурная схема модулей DL-system и TS-system

Вычислительные эксперименты, тестирующие работу системы, описаны в [7, 8, 15].

Система прогнозирования с использованием методов глубокого обучения

Рассмотрим системы глубокого обучения DL-System для моделирования и прогнозирования данных одномерных временных рядов. Лучшая модель выбирается после сравнения средней абсолютной ошибки (MAE), RMSE и R-квадрат (R^2).

При моделировании возник ряд проблем с длинными последовательностями в базе данных [9]:

- обучение требует много времени и больших объемов памяти;
- получение плохо обученной модели из-за обратного распространения длинных последовательностей.

Таким образом, важно подготовить и предварительно обработать данные перед их импортом в нейронные сети. Для этого на этапе подготовки данных могут использоваться методы нормализации и стандартизации данных. В рассматриваемом случае использована стандартизация данных, которая реализована как метод масштабирования. Этот метод позволяет установить среднее значение и стандартное отклонение равными 0 и 1 соответственно.

Набор данных разбивается на три набора: для обучения, проверки и тестирования. Набор данных дополнительно подготавливается следующим образом: первые 95% значений из набора данных используются для обучения; последние 5% значений из набора данных используются для тестирования.

Учебный набор используется для обучения и улучшения моделей, поэтому 20% обучающих данных используются для проверки, диагностики переобучения и недостаточного обучения, а тестовый набор используется для оценки производительности модели. Полный текст программы и набор данных, на котором проводился эксперимент, представлены в [5].

После использования обработанных данных обучающего набора для обучения LSTM, Stacked LSTM (LSTMs), BiLSTM, Stacked BiLSTMs, GRU, CNN, and CONVLSTMs (см. рис.2) соответственно, модель, завершенная обучением, используется для прогнозирования данных тестового набора, а реальное значение сравнивается с прогнозным. Лучшая модель должна иметь наименьшие значения RMSE, MAE и MSE и наибольшее значение R^2 . На рис. 2 приведен механизм предлагаемой системы прогнозирования DL-System.

Вычислительные эксперименты приведены в [8, 10, 11].

Объединение моделей временных рядов с помощью установки приоритета весов для моделей временных рядов

На рисунке 3 приводится идея работы оптимизатора, где после получения прогнозных значений от моделей временных рядов и нейронных сетей они объединяются и им присваиваются веса.

Вычислительный эксперимент показал, что задание веса, равного 0.9, для лучшей модели временного ряда и нейронных сетей и равномерное

распределение (1-0.9) по остальным моделям позволяет получить точные результаты с меньшими значениями ошибок.

Исходный код для двух рассмотренных систем прогнозирования с использованием этого алгоритма опубликован на GitHub [11], имеются свидетельства о регистрации программ для ЭВМ [4, 5].

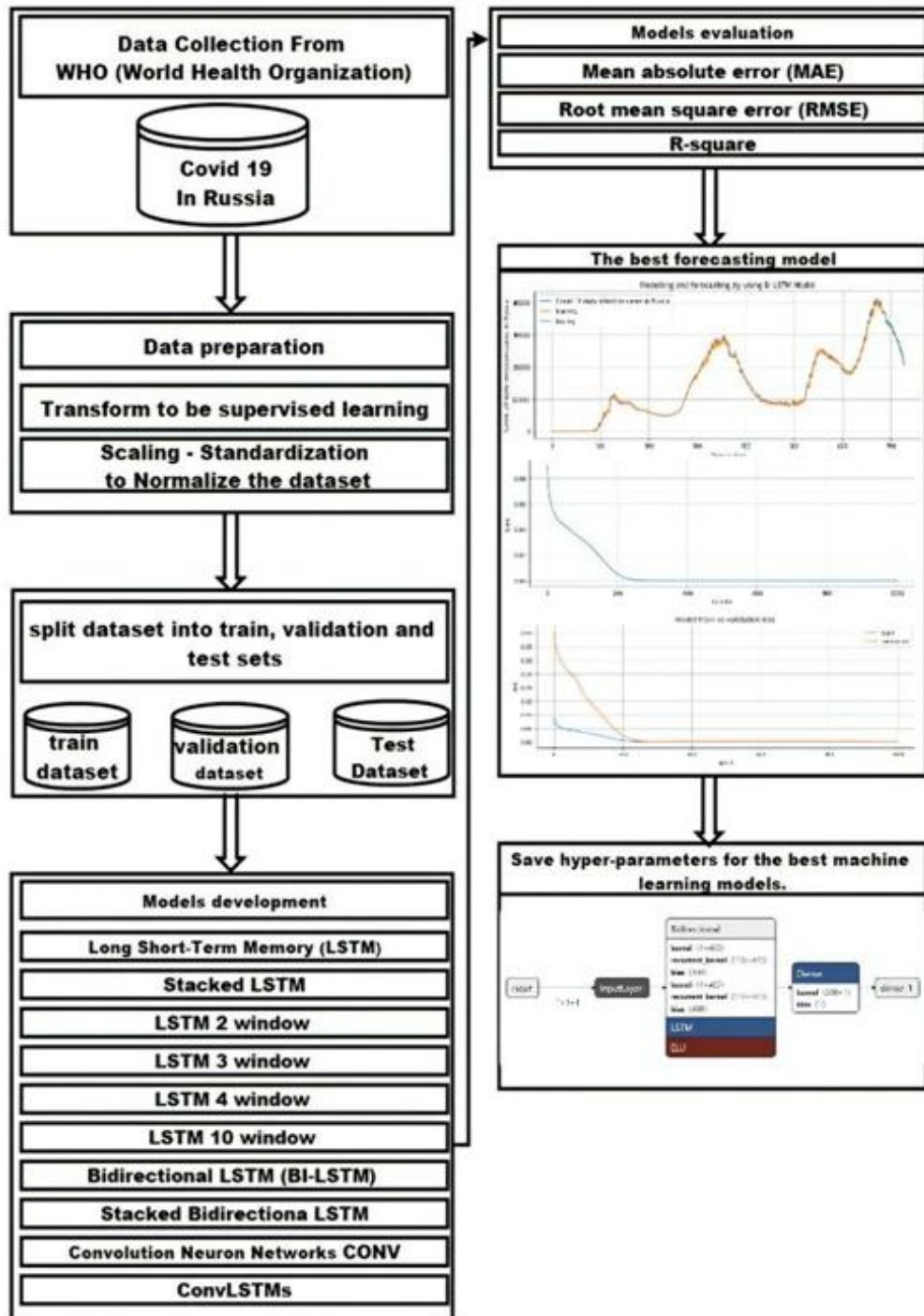


Рис.2. Схема работы системы DL-System

Программное обеспечение для алгоритма идентификации параметров квазилинейного рекуррентного уравнения с помощью обобщенного метода наименьших отклонений (GLDM)

В модуле [6] реализованы рассмотренные в [12] алгоритмы для определения коэффициентов $a_1, a_2, a_3, \dots, a_m \in \mathbb{R}$ квазилинейной авторегрессионной модели m -го порядка

$$y_t = \sum_{j=1}^{n(m)} a_j g_j(\{y_{t-k}\}_{k=1}^m) + \varepsilon_t, \quad t=1, 2, \dots, T$$

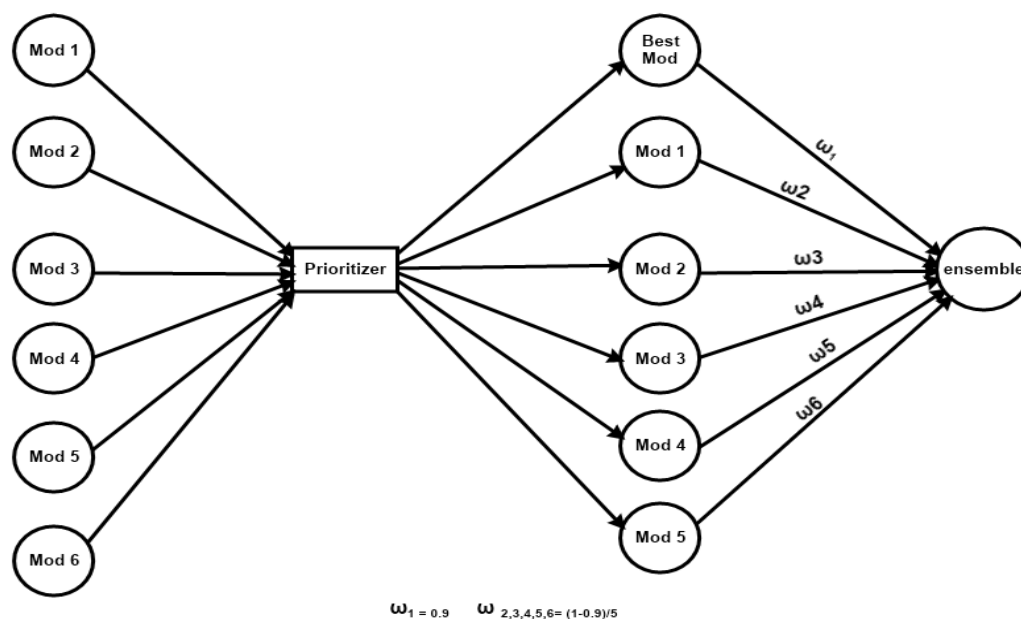


Рис. 3. Объединение моделей временных рядов путем определения приоритетов моделей и присвоения весов моделям временных рядов для TS-system

по актуальной информации о значениях переменных состояния $\{y_t \in \mathbb{R}\}_{t=1-m}^T$ в моменты времени t ; где $g_j: (\{y_{t-k}\}_{k=1}^m) \rightarrow \mathbb{R}, j = 1, 2, \dots, n(m)$ заданы $n(m)$ функций, а $\{\varepsilon_t \in \mathbb{R}\}_{t=1}^T$ - неизвестные ошибки.

Рассматриваемый алгоритм работает следующим образом (см. рис. 4).

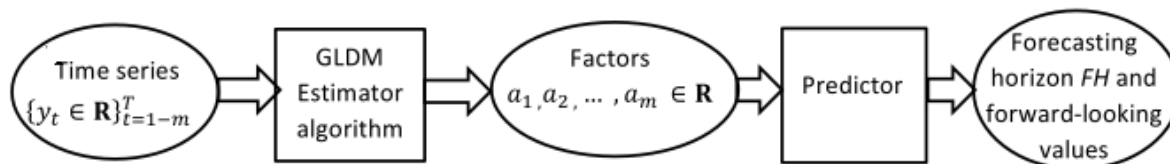


Рис. 4. Схема реализации модели

Алгоритм GLDM [12] на входе получает временной ряд $\{y_t \in \mathbb{R}\}_{t=-1-m}^T$ длины $T + m \geq (1 + 3m + m^2)$ и определяет коэффициенты $a_1, a_2, a_3, \dots, a_m$, решая задачу оптимизации

$$\{a_j^*\}_{j=1}^{n(m)} = \underset{\{a_j\}_{j=1}^{n(m)} \subset \mathbb{R}}{\operatorname{argmin}} \left[\begin{array}{c} T \sum_{j=1}^{n(m)} a_j g_j(\{y_{t-k}\}_{k=1}^m) - y_t \\ \sum_{t=1}^T \arctan \left[\right] \end{array} \right]$$

Распределение Коши

$$F(\xi) = \frac{1}{\pi} \arctan(\xi) + \frac{1}{2}$$

имеет максимальную энтропию среди распределений случайных величин, не имеющих математического ожидания и дисперсии. Поэтому в качестве функции потерь применяется функция $\arctan(\cdot)$.

Разработанный программный модуль использует модель m -го порядка с квадратичной нелинейностью, поэтому базовый набор функций $g_{(*)}$ содержит

$$g_{(k)}(\{y_{t-k}\}_{k=1}^m) = y_{t-k}, \quad k = 1, 2, \dots, m$$

$$g_{(kl)}(\{y_{t-k}\}_{k=1}^m) = y_{t-k} \cdot y_{t-l}, \quad k = 1, 2, \dots, m; \quad l = k, k+1, \dots, m.$$

Очевидно, в этом случае $n(m) = 2m + C_m^2 = m(m+3)/2$, а нумерация функций $g_{(*)}$ может быть произвольной.

Предиктор формирует индексированное $t = 1, 2, \dots, T-1, T$ семейство разностных уравнений m -го порядка

$$\overline{y[t]}_\tau = \sum_{j=1}^{n(m)} a_j^* g_j(\{\overline{y[t]}_{\tau-k}\}_{k=1}^m), \quad \tau = t, t+1, t+2, t+3, \dots, T-1, T, T+1, \dots$$

для решетчатых функций $\overline{y[t]}$ со значениями $\overline{y[t]}_\tau$, которые интерпретируются как построенный в момент времени t прогноз для y_τ .

В [13] показано, что модель, использующая выявленные параметры, позволяет получить долгосрочный прогноз. В отличие от нейросетевых моделей и моделей глубокого обучения этот подход позволяет в явном виде получать качественные квазилинейные разностные уравнения (адекватно описывающие рассматриваемый процесс). В [14] описывается параллельная реализация данного алгоритма.

Заключение

Говоря о качестве модели, полученной с помощью алгоритма GLDM, можно отметить, что она работает не хуже нейросетевых моделей или классических статистических моделей. У нее есть одно существенное преимущество по сравнению с этими моделями, заключающееся в возможности интерпретировать коэффициенты модели с точки зрения задачи исследования. Проведенное нами тестирование этой модели на данных о кумулятивных случаях заражения вирусом Covid-19 в Челябинской области показало, что ошибка прогноза меньше, чем для остальных моделей. Направлениями дальнейших исследований является интеграция линейных моделей и моделей нейронных сетей для получения точных результатов прогнозирования, а также построение детерминированных моделей.

Библиографический список

1. Li, Q., Wang, J., Zhang, H.: A wind speed interval forecasting system based on constrained lower upper bound estimation and parallel feature selection. *Knowl. Based Syst.* 231, 107,435 (2021). doi:10.1016/j.knosys.2021.107435.
2. Khashei, M., Chahkoutahi, F.: A comprehensive low-risk and cost parallel hybrid method for electricity load forecasting. *Comput. Ind. Eng.* 155, 107,182 (2021). doi:10.1016/j.cie.2021.107182.
3. Supuwiningasih N.N., Kadeksukerti N., Putra A., Dewanti P. Forecasting of Agricultural Production Results in South Denpasar Using Quadratic Trend Method Based GIS// *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, Vol. 5, Iss.2, 2018. DOI: 10.5281/zenodo.1186523
4. Макаровских Т.А., Аботалеб М.С.А. Библиотека epidemic.ta для прогнозирования случаев заражения Covid-19 // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021616747, дата публикации 26.04.2021
5. Макаровских Т.А., Аботалеб М.С.А. Система прогнозирования для одномерных временных рядов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022660664, дата публикации 08.06.2022.
6. Abotaleb M.S.A., Makarovskikh T.A., GLDM predictor, <https://github.com/tmakarovskikh/GLDMPredict>, Feb 2022, accessed on 2022-Aug.
7. M. Abotaleb and T. Makarovskikh, Development of algorithms for choosing the best time series models and neural networks to predict covid-19 cases // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*, vol. 21, no. 3, pp. 26–35, 2021.
8. M. Abotaleb and T. Makarovskikh, System for forecasting covid-19 cases using time-series and neural networks models // *Engineering Proceedings*, vol. 5, no. 1, p. 46, 2021.
9. Khan S. D., Alarabi L., Basalamah S. Toward smart lockdown: a novel approach for COVID-19 hotspots prediction using a deep hybrid neural network 16 // *Computers*. – 2020. – Т. 9. – №. 4. – С. 99.
10. T. Makarovskikh and M. Abotaleb, Two systems for forecasting covid-19, <https://github.com/abotalebmostafa11/2-systems-for-forecasting-covid-19>, May 2021, accessed on 2021-May-22.
11. T. Makarovskikh and M. Abotaleb, “DL-system,” <https://github.com/abotalebmostafa11/DL-System>, April 2022, accessed on 2021-April.
12. A. V. Panyukov and Y. A. Mezaal, “Improving of the identification algorithm for a quasilinear recurrence equation,” in *International Conference on Optimization and Applications*. Springer, 2020, pp. 15–26.
13. Panyukov, A. V., Mezaal Y. A. Stable estimation of autoregressive model parameters with exogenous variables on the basis of the generalized least absolute deviation method, *IFAC-PapersOnLine*, Vol.51, 2018, pp. 1666–1669.
14. Makarovskikh, T. A., Panyukov, A. V., Abotaleb M. S. A Generalized Least Deviation Method for identification of quasi-linear autoregressive model. Available at: <https://github.com/tmakarovskikh/GLDMPredictor.git>.

15. Makarovskikh T., Abotaleb M. Comparison Between Two Systems for Forecasting Covid-19 Infected Cases //International Conference on Computer Science Protecting Human Society Against Epidemics. – Springer, Cham, 2021. – C. 107-114.

ЗАДАЧА КОШИ УРАВНЕНИЙ ФИЛЬТРАЦИИ СУСПЕНЗИИ В ГЛУБОКОМ ПОРИСТОМ СЛОЕ И ЕЕ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

С.С. Мухина

В работе рассматривается модель глубокой фильтрации суспензии в однородной недеформируемой пористой среде, описываемая системой нелинейных уравнений в частных производных первого порядка гиперболического типа. Методами контактной геометрии найдено его общее точное решение для линейной функции вероятности захвата частиц пористой средой. В этом случае удалось найти точное решение задачи Коши. Сделаны выводы о характере изменения фильтрационных свойств среды с течением времени при возникновении осадка.

Ключевые слова: глубокая фильтрация, пористая среда, точное решение, задача Коши, контактные преобразования, волновое уравнение.

Последние пять десятилетий фильтрация суспензии широко исследуется. Суспензия представляет из себя дисперсную систему, состоящую из двух фаз: жидкой – дисперсионной среды (нефть, вода) и твердой – дисперсной фазы (бактерии, вирусы, глинистые минералы). Основоположниками теории движения жидкости с твердыми взвешенными частицами являлись С.В. Избаш, А.Н. Патрашев, Д.М. Минц, Н.Н. Веригин [1]. Пористая среда, в которой происходит фильтрация суспензии, содержит пустоты (поры) в большом количестве, соединенные между собой. Этот слой и является фильтром, который удерживает мельчайшие твердые частицы. Примерами пористых сред являются горные породы, почва и искусственные породы.

Задача фильтрации суспензии в пористой среде применяется в нефтяной, химической, горнодобывающей и пищевой промышленности. В нефтяной отрасли используют при добыче и переработке нефти, например, при изучении миграции мелких частиц и глинистых минералов при вторичной и третичной добыче, при борьбе с заиливанием нагнетательных скважин путем постепенного накопления слоя на дне скважины, при применении суспензии буровых растворов, а также при гидроразрывах пласта. В химической промышленности – это очистка с помощью песчаных и других фильтров промышленной и питьевой воды. В результате целью применения суспензии может стать либо фильтрация частиц гранулированными средами, либо, наоборот, избегание фильтрации частиц.

Дисперсные частицы могут иметь размеры от нескольких нанометров (макромолекулярных размеров) до долей миллиметра. Проводится различие между коллоидными и взвешенными частицами [2]: коллоидные частицы –

частицы с размером от 1 до 1000 нм, а взвешенные частицы с размером более 1 мкм. В работе мы рассмотрим взвешенные частицы.

Из подходов к процессам осаждения взвешенных частиц можно выделить классические модели фильтрации глубокого слоя (модели “deep-bed filtration”) и модифицированные: стохастические, сеточные и перколяционные модели. Мы рассматриваем именно классический подход. Процессы осаждения являются доминирующим процессом для разделения взвешенных частиц размером более 1 мкм. Особенность глубокой фильтрации в том, что частицы, подлежащие удалению из суспензии, значительно меньше размеров пор. Таким образом, не формируется внешняя фильтрационная корка.

Модель “deep-bed filtration” обычно рассматривается на микроскопическом и на макроскопическом уровнях. Микроскопическое представление обычно использует последовательность транспортных механизмов, таких, как перехват частиц, инерция, диффузия, отложение осадка, гидродинамическое действие и местная турбулентность. В зависимости от выбора уровня исследования можно говорить о двух современных подходах к математическому описанию теории переноса частиц. Это 1) траекторный анализ, учитывающий распределение пор и твердых частиц по размерам, который использует микроскопический уровень и 2) феноменологический, который основывается на кинетических уравнениях зависимости между проницаемостями пористой среды и содержанием твердых частиц. Феноменологический подход к фильтрации развился из попыток описать изменения концентрации или массы частиц в поступающей системе по мере перемещения внутри фильтра. По сути, это формулировка уравнения баланса массы с соответствующими параметрами модели для описания накопления частиц внутри пор.

Существует несколько способов захвата твердых частиц пористой средой: обратимый и необратимый. В последнем способе частицы не возвращаются в поток после захвата поровыми «ловушками», а частицы, которые осаждаются и затем возвращаются в поток – это обратимый процесс. В нашем случае будет рассмотрен необратимый способ осадкообразования.

Обратимся к феноменологической модели. Когда жидкость проходит через фильтр, некоторые частицы могут осаждаться на поверхности. Рассмотрим движущуюся несжимаемую жидкость, в которой взвешены твердые несжимаемые частицы.

Пусть V – объем пористой среды. Тогда в единице объема содержатся:

V_u – объем, занимаемый частицами во флюиде;

V_w – объем, занимаемый водой;

V_v – объем, занимаемый частицами на стенках пор;

V_r – объем, занимаемый твердой составляющей порового пространства.

Тогда концентрация взвешенных частиц во флюоиде $u = \frac{V_u}{V_u + V_w}$; концентрация жидкой фазы во флюоиде $1 - u$; доля захваченных частиц $v = \frac{V_v}{V}$; пористость среды $m = \frac{V - V_r - V_v}{V}$.

Введем безразмерные параметры, определив характерный объем V . В системе, диаметр порового пространства которой намного больше диаметра взвешенных частиц, диффузионным массопереносом в радиальном направлении можно пренебречь и поток считать одномерным.

Пусть t – время фильтрации, x – пространственная координата (ось Ox направлена в сторону фильтрации). Если скорость суспензии постоянна, то и концентрация смеси сохраняется постоянной. Из экспериментов [3] было получено, что скорости перемещения твердых взвешенных частиц в порах пропорциональны скорости фильтрации жидкой фазы, а коэффициент пропорциональности принимает близкое к единице значение. Тогда можем выбрать скорость частиц U_p и скорость жидкости U_w равными $U_p = U_w = U$.

Для взвешенных частиц закон сохранения массы имеет вид [4]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_p v + \rho_p m u) + \text{div}(\rho_p u U) = 0. \quad (1)$$

где ρ_p – плотность частицы. Так как частицы не сжимаемы $\rho_p = \text{const}$, то уравнение (1) принимает вид

$$\frac{\partial}{\partial t}(v + m u) + \text{div}(u U) = 0. \quad (2)$$

Уравнение неразрывности для жидкой фазы с учетом не сжимаемости жидкости:

$$\frac{\partial}{\partial t}(m(1 - u)) + \text{div}((1 - u)U) = 0. \quad (3)$$

Если первоначальная пористость грунта равна m_0 , то $m = m_0 - v$. Сложив уравнения (2) и (3), получим $\text{div} U = 0$, следовательно,

$$U(t, x) = U(t) = U(0) = u_0 = \text{const}.$$

Пусть скорость поступающей в пласт суспензии равна $u_0 = 1$. Для описания фильтрации флюоида используют закон Дарси:

$$U = -\frac{k}{\mu} \Delta p,$$

где $k(v), \mu(u)$ – коэффициент проницаемости и динамическая вязкость жидкого флюоида соответственно, Δp – градиент парциального давления.

Выберем $m_0 = 1$, тогда в случае одномерной фильтрации суспензии уравнение баланса массы для дисперсной фазы будет иметь вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(v + u) + \frac{\partial u}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Обратимся ко второму уравнению модели. Оно должно показывать интенсивность процесса осаждения. Работы многих авторов посвящены установлению кинетической зависимости, отвечающей за изменение во времени доли захваченных частиц. При фильтрации суспензии скорость осаждения $\frac{\partial v}{\partial t}$ зависит от количества частиц, доступных для осаждения, то есть от концентрации взвешенных частиц u , а также от концентрации удерживаемых частиц пористой средой v . Осадок изменяется в процессе эксплуатации, также в зависимости от пространственной координаты. Способность фильтра улавливать мельчайшие частицы улучшается по мере увеличения осаждения частиц. В работе [5] на основе экспериментов было предположено, что скорость захвата частицы в данный момент времени и в данном сечении может иметь простой вид

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \lambda U u,$$

где λ – коэффициент фильтрации, выражающий вероятность захвата частицы фильтром в течение интервала времени, меняется по мере накопления частиц в пористой среде и изменения характеристик фильтрующего воздействия. Пусть в начале фильтрации $\lambda = \lambda_0 = 1$, тогда

$$\lambda = \lambda_0 h(v),$$

где h – поправочный коэффициент фильтрации, выражающий вероятность захвата частицы по длине фильтрации, $h(0) = 1$. Он зависит от параметров суспензии и среды. Следовательно, уравнение кинематики процесса коагуляции с учетом постоянства скорости фильтрационного течения имеет вид

$$\frac{\partial v}{\partial t} = h(v)u. \quad (5)$$

Математическая модель, описывающая одномерный случай глубокой фильтрации суспензии в пористом слое, из (4) и (5) принимает вид

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial x} - h(v)u, \\ \frac{\partial v}{\partial t} = h(v)u. \end{cases} \quad (6)$$

Для построения модели (6) были приняты следующие допущения:

- 1) скорость частиц совпадает со скоростью несущей жидкости и равна единице;
- 2) влияние концентрации суспензии на ее вязкость не учитываются;
- 3) первоначальная пористость пространства равна единице;
- 4) диффузионным движением жидкости пренебрегается, так как частицы достаточно большие;
- 5) течение одномерное в направлении оси Ox ;
- 6) жидкость, частицы и пористая среда несжимаемы.

Система уравнений (6) рассматривается в области

$$\Omega = \{0 \leq x \leq 1, t \geq 0\}.$$

В работе [6] для системы (6) были построены конечномерные динамики, что позволило найти его частные решения другим методом. Симметричный анализ системы (6) был проведен в работе [7].

Для корректного определения задачи фильтрации суспензии необходимо добавить начальные условия, показывающие распределение частиц в глубоком слое фильтрата. Пусть в начальный момент времени концентрация взвешенных и осажденных частиц имела вид

$$u(t, x)|_{t=0} = U(x), \quad v(t, x)|_{t=0} = V(x). \quad (7)$$

Решив задачу Коши для системы фильтрации суспензии, мы сможем найти все фильтрационно-емкостные параметры пористой среды. То есть чтобы определить значения всех насыщенностей, пористости, градиента давления достаточно получить значения объемной концентрации взвешенных и осажденных частиц как функции от координат и времени. Обратимся к построению точного решения методами контактной геометрии.

С помощью геометрических преобразований необходимо привести исходную систему к волновому уравнению, решение которого хорошо известно. Исходная система Якоби в пространстве \mathbb{R}^4 может быть представлена парой дифференциальных 2-форм [8]. Полученная система может быть сведена к симплектическому уравнению Монжа–Ампера гиперболического типа. Однако применение симплектических преобразований для приведения к волновому уравнению невозможно [9]. Если коэффициент захвата частиц линейный $h(v) = \alpha v + \beta$, то обе дифференциальные формы Лапласа [10] уравнения (6) равны нулю. При этом система все еще остается нелинейной. Тогда соответствующее уравнение Монжа-Ампера может быть сведено к волновому уравнению с помощью контактных преобразований, и система будет приведена к волновому уравнению.

В результате применения обратного контактного преобразования к решению волнового уравнения, мы получаем точное решение уравнения фильтрации в глубоком слое [11]

$$\begin{cases} u(t, x) = \frac{-A'(x-t)}{-\alpha A(x-t) + \alpha B\left(\frac{x}{\alpha}\right)}, \\ v(t, x) = \frac{\alpha \beta B\left(\frac{x}{\alpha}\right) - B'\left(\frac{x}{\alpha}\right) - \alpha \beta A(x-t)}{\alpha^2 \left(A(x-t) - B\left(\frac{x}{\alpha}\right)\right)}, \end{cases} \quad (8)$$

где A, B – произвольные функции.

Перейдем к визуализации найденных точных решений (8). Выберем линейный параметр захвата вида $h(v) = 1 + v$, т.е. $\alpha = 1, \beta = 1$. Данная функция

совпадает с одним из вариантов, которая была предложена Iwasaki в 1937 году [4]: $h(v) = 1 + bv, b > 0$. Точное решение из (8) будет иметь вид

$$\begin{cases} u(t, x) = \frac{A'(x-t)}{A(x-t)-B(x)}, \\ v(t, x) = \frac{-A(x-t)+B(x)-B'(x)}{A(x-t)-B(x)}. \end{cases} \quad (9)$$

Подставив начальные условия в систему (9), мы получим систему для определения функций A, B :

$$\begin{cases} u(0, x) = \frac{A'(x)}{A(x)-B(x)}, \\ v(0, x) = \frac{-A(x)+B(x)-B'(x)}{A(x)-B(x)}. \end{cases} \quad (10)$$

Приравняв систему (10) к начальным условиям (7), получим систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{A'(x)}{A(x)-B(x)} = U(x), \\ \frac{-A(x)+B(x)-B'(x)}{A(x)-B(x)} = V(x). \end{cases} \quad (11)$$

Решив систему (11), мы получили

$$\begin{cases} A(x) = C \int U(x) e^{\int_1^x (V(\tau') + U(\tau') + 1) d\tau'} dx + A(0), \\ B(x) = -C \int (V(x) + 1) e^{\int_1^x (V(\tau') + U(\tau') + 1) d\tau'} dx + B(0), \end{cases} \quad (12)$$

где $C = A(0) - B(0)$.

Предположим, что первоначально в пористом слое взвешенные и осажденные частицы распределены согласно законам

$$U(x) = -0.3x + 0.3, V(x) = -0.07x + 0.07, \quad (13)$$

профиль их распределения в единице объема пор представлен на рис. 1.

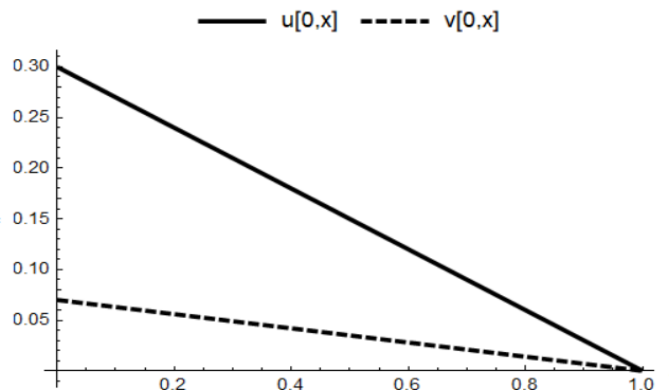


Рис. 1. Начальные распределения частиц

Подставив (12), (13) в (9), найдем значения неизвестных величин при линейном виде коэффициента захвата частиц.

В результате концентрация взвешенных и осажденных частиц при выбранных начальных условиях

$$\begin{cases} u(t, x) = -\frac{3.13e^{-(1.59-0.43(x-t))^2} + \mu(-1.37 + 0.37(x-t))}{0.06e^{(1.37-0.19x)x} + \mu - Err}, \\ v(t, x) = \frac{3.13e^{-(1.59-0.43x)^2} - 0.06e^{(1.37-0.19x)x}(2.37 - 0.37x) - \mu + Err}{0.06e^{(1.37-0.19x)x} + \mu - Err}, \end{cases}$$

где

$$Err = 6.45Erf(1.59 - 0.43x) - 6.45Erf(1.59 - 0.43(x - t)),$$

Erf – функция ошибок, $\mu = 0.25e^{(1.37-0.19(x-t))(x-t)}$.

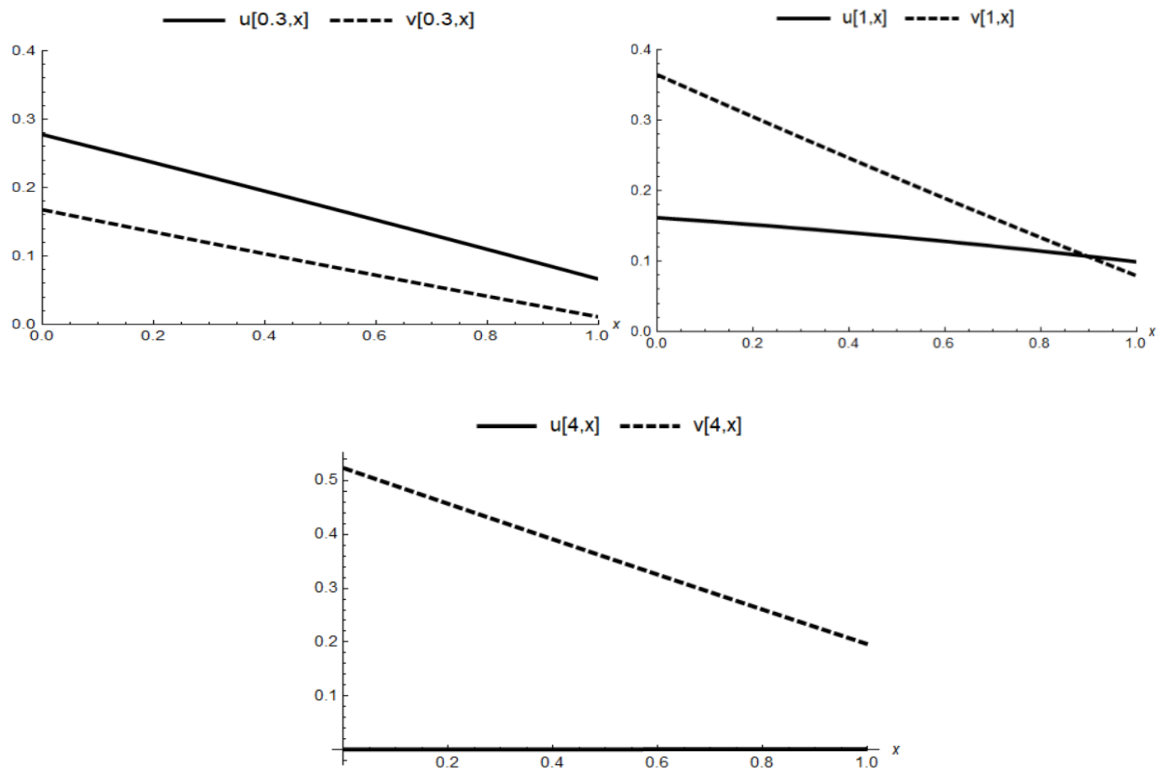


Рис. 2. Изменения концентраций взвешенных и осажденных частиц во времени

Графики визуализации найденного точного решения в разные моменты ($t = 0.3; 1; 4$) времени представлены на рис. 2. Из полученных графиков можно сделать вывод, что значение концентрации взвешенных частиц сначала увеличивается по длине порового канала, затем быстро уменьшается до нуля, а концентрация осажденных частиц увеличивается постепенно. Непрерывное осаждение частиц приводит к уменьшению пористости слоя и к уменьшению концентрации взвешенных частиц.

Пористая среда забивается осадком, изменяется локальная структура пор, формируется внутренняя фильтрационная корка, которая не способна пропускать твердые частицы поступающего флюида, проницаемость среды и другие фильтрационно-емкостные характеристики уменьшается по сравнению с первоначальным состоянием.

Заключение. В работе рассмотрена задача фильтрации суспензии в глубоком пористом слое. Получены точные решения задачи Коши и найдено распределение концентраций частиц, взвешенных во флюиде и осаждаемых с течением времени на стенках пор. Произведена визуализация. Проведен анализ характера течения мельчайших частиц, их осаждения, изменения структуры и свойств пор.

Библиографический список

1. Шехтман, Ю.М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий / Ю.М. Шехтман. – М.: АН СССР, 1961. – 211 с.
2. Zamani, A. Flow of dispersed particles through porous media – deep bed filtration / A. Zamani, B. Maini // J. Petroleum Science and Engineering. – Netherlands. – 2009. – Vol. 69, No. 1–2. – P. 71–88.
3. Herzig, J.P. Flow of Suspensions through Porous Media / J.P. Herzig, D.M. Leclerc, P. Le Goff // Application to Deep Filtration. – Ind. Eng. Chem. – 1970. – Vol. 62, No. 5 – P. 8–35.
4. Iwasaki, T. Some notes on sand filtration / T. Iwasaki // J. Am. Water Works Assoc. – 1937. – Vol. 29. – P. 1591–1602.
5. Gorinov, A.A. Dynamics of Evolutionary PDE Systems / A.A. Gorinov, A.G. Kushner // Lobachevskii Journal of Mathematics. – Kazan State University. – 2020. – Vol. 41, No. 12. – P. 2448–2457.
6. Кушнер, А.Г. Симметрии и точные решения уравнений глубокой фильтрации суспензии в пористой среде / А.Г. Кушнер, С.С. Мухина // Труды 14-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2021). – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 654–660.
7. Lychagin, V.V. The theorems of Sophus Lie for the Monge–Ampere equations / V. V. Lychagin, V. N. Rubtsov // Dokl. Akad. Nauk BSSR. – 1983. – Vol. 27. – P. 396–398.
8. Kushner, A.G. A contact linearization problem for Monge–Ampere equations and Laplace invariants / A.G. Kushner // Acta Appl. Math. – 2008. – Vol. 101, No. 1–3. – P. 177–189.
9. Kushner, A.G. Integration of the deep bed filtration equations / A.G. Kushner, S.S. Mukhina // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2022. – Vol. 43, No. 11. – P. 73–80.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСА РАБОТ ПО ИСПОЛНИТЕЛЯМ

А.А. Панюкова, Т.А. Макаровских

Рассматривается задача распределения комплекса взаимосвязанных работ, представленного ациклическим оргграфом по множеству исполнителей. Рассматриваемая задача состоит в поиске однозначного отображения, удовлетворяющего заданной системе ограничений, т.е. является полуопределенной квадратичной задачей о назначениях, известной как задача Вебера. Особенностью рассматриваемой задачи для мобильных приложений является специальный вид графа и его малая размерность при относительно большом множестве исполнителей.

Ключевые слова: комплекс услуг, задача Вебера, ориентированный граф, алгоритм.

Развитие рынка исполнителей различных услуг требует разработки эффективных специализированных мобильных приложений. Наиболее развитыми и известными из них являются сервисы такси и доставки, в первую очередь еды. Также развиваются сервисы для оперативного поиска исполнителей для взаимосвязанного комплекса услуг, например, проведение фотосессии: заказчик нанимает фотографа, тот (возможно) арендует некоторое оборудование для проведения съемки, а заказчик может пользоваться услугами визажиста и арендовать студию.

Основные проблемы возникают при увеличении нагрузок на сервисы. Лицо, арендующее автомобиль в каршеринге может не найти автомобиль в указанном месте. Сервис доставки еды может принимать заказы, но не доставлять их (в силу разных причин). Такси также могут «терять» заказы, или отказываться к моменту требуемой подачи машины. В условиях высокой нагрузки оперативно решить проблему не получается, система может зависать и не реагировать. При этом, службы технической поддержки, как правило, замечают проблему с сервисом спустя пару часов (были прецеденты, что до четырех часов). Автоматические решения возникающей проблемы в настоящее время крайне неразвиты. В идеале пользователь должен получить выбор в сложившейся проблемной ситуации.

В настоящее время выбор исполнителей полностью лежит на пользователе, без возможности рассмотреть варианты, которые перегруженная система не всегда в состоянии предоставить.

С организационно-управленческой точки зрения, система должна провести оценку и перераспределение имеющихся ресурсов в рамках выстроенных цепочек. Например, в случае каршеринга – провести

переоценку имеющихся автомобилей, плана по аренде, мест размещения и предоставить вариант решения.

Таким образом, актуальна разработка онлайн-сервисов, осуществляющих оперативный поиск исполнителей для выполнения взаимосвязанного комплекса работ.

Общепринятой моделью комплекса является его представление в виде связного ациклического ориентированного графа $G(V, A)$, где V – множество работ, в котором имеется единственная вершина $v^{(0)}$ $\deg^-(v^{(0)})=0$, A – отношение смежности на множестве работ: из $(v_i, v_j) \in A$ следует, что работа $v_j \in V$ может быть выполнена только при условии выполнения предшествующей смежной работы $v_i \in V$ [1, 2]. Множество U возможных исполнителей представлено, например, в базе данных самозанятых соответствующей службы.

На множестве $V \times U$ задана вектор-функция $f: V \times U \rightarrow \mathbb{Z}^+{}^N$. Координатные функции $f_i(v, u)$, $i=1, 2, \dots, N$ определяют различные показатели качества выполнения работы $v \in V$ исполнителем $u \in U$. Отношение совместимости пары соисполнителей $\{u_k, u_l\} \subset U$ при выполнении смежных работ $(v_i, v_j) \in A$ моделируются вектор функцией $g: A \times \{\{u_1, u_2\} \subseteq U\} \rightarrow \mathbb{Z}^+{}^M$. Координатные функции $g_i((v_i, v_j), u_1, u_2)$ $i=1, 2, \dots, M$ определяют различные показатели качества выполнения смежных работ $(v_i, v_j) \in A$ исполнителями u_1, u_2 . Задача состоит в нахождении такого однозначного отображения $\varphi: V \rightarrow U$, то есть назначению каждой работе $v \in V$ исполнителя $u \in U$, что

$$\varphi = \arg \min_{\varphi: V \rightarrow U} \left[\sum_{v \in V} f(v, \varphi(v)) + \sum_{(v_1, v_2) \in A} g((v_1, v_2), \varphi(v_1), \varphi(v_2)) \right], \quad (1)$$

где f, g – заданные функции.

Отличительной особенностью задач, возникающих в онлайн-сервисах является относительно небольшой граф $G(V, A)$, представляющий описание заказа на выполнение работ, и достаточно большое множество U возможных исполнителей, представленных в базе данных самозанятых соответствующей службы.

Рассматриваемый сервис для выполнения комплекса работ на основе имеющихся данных должен предложить исполнителей, удовлетворяющих критериям заказчика.

Проблема взаимно однозначного распределения работ по исполнителям, при условии, что стоимость выбора является суммой функции расстояния и потока между исполнителями, а также затрат, связанных с назначением исполнителя на определенную работу, формализуется в терминах квадратичной задачи о назначении (QAP) [3, 4].

QAP является одной из NP -трудных задач. Современные методы решения используют методы ветвей и границ, которые полагаются на получение легко вычисляемых и достаточно точных границ. Тем не менее, решение QAP общего вида за приемлемое время возможно для задач размерности не более 20.

В связи с этим, имеется большое число работ, посвященных QAP специального вида. В работе [5] представлен алгоритм точного решения QAP, когда граф $G(V, A)$ является корневым деревом. Алгоритм основан на целочисленной постановке задачи. Границы вычисляются с использованием лагранжевой релаксации. Для решения релаксированной задачи дан полиномиальный алгоритм динамического программирования. В работе [6] рассмотрены задачи, когда структура связей между размещаемыми объектами представлена в виде неориентированного графа G , а область, в которой производится размещение, — в виде сети. Предложены полиномиальные алгоритмы размещения невзвешенных цепи и цикла на взвешенном дереве произвольной структуры, а также графа общего вида на звезде и звезды на произвольной сети для взвешенных постановок задачи. В работе [7] представлены два новых класса QAP, которые могут быть сведены к задаче линейного программирования, даны полиномиальные алгоритмы проверки принадлежности индивидуальной задачи данным классам.

Проблема однозначного распределения работ по исполнителям, при котором каждой работе назначен исполнитель, при этом один и тот же исполнитель может быть назначен для выполнения нескольких работ, представляет полуопределенную квадратичную задачу о назначении (SQAP), известную как задача Вебера [8]. Меньшее количество ограничений в задаче Вебера позволяет повысить эффективность алгоритмов ее решения. В работе [8] представлен полиномиальный алгоритм точного решения SQAP для корневого дерева $G(V, A)$ с вычислительной сложностью $O(|V| \cdot |U|^2)$, описаны различные варианты его применения.

В общем случае SQAP остается NP -трудной. В работе [9] предлагается последовательный детерминированный алгоритм, находящий точное решение задачи для k -дерева. Алгоритм использует идею динамического программирования на основе дерева декомпозиции [10]. Проведен вычислительный эксперимент по анализу эффективности предложенного алгоритма в сравнении с пакетом IBM ILOG CPLEX. В работе [11] для решения SQAP для k -дерева предложен полиномиальный алгоритм с гарантированной апостериорной оценкой точности; выделен класс задач со специальными функциями стоимости размещения, на котором алгоритм является 2-приближенным. Доказано, что если размещаемый граф содержит один простой цикл, а множество позиций размещения является метрическим пространством, то предложенный алгоритм является 2-

приближенным и гарантированно асимптотически точным. Проведен вычислительный эксперимент по анализу погрешности алгоритма и его оценки точности.

Проведенный обзор публикаций показывает, что все известные постановки задач QAP и SQAP, за исключением задач размещения дерева, предполагают размещаемый граф G неориентированным, т.е. не вполне соответствуют условиям задачи (1). Цель работы – разработка алгоритмов решения задачи (1).

Основные понятия. Понятие k -дерева на классе неориентированных графов был введен в 70-х годах прошлого столетия в работе [12]. Свойства таких k -деревьев подробно рассмотрены в [10, 12].

Для построения эффективных алгоритмов решения задачи (1) введем понятие ориентированного симплициального k -дерева и смежные понятия.

Определение 1. Полный ациклический орграф, содержащий k вершин, будем называть ориентированной k -кликой. Такая клика содержит вершину с полустепенью исхода равной k , которую будем называть ее корнем.

Определение 2. Связный ациклический ориентированный граф D будем называть ориентированным симплициальным k -деревом, если его построение возможно осуществить рекурсивно по следующим правилам:

- ориентированная ациклическая $k+1$ клика есть ориентированное симплициальное k -дерево $T^{(k+1)}$ с $k+1$ вершиной;
- ориентированное симплициальное k -дерево $T^{(i+1)}$ с $(i+1)$ вершинами получается из ориентированного симплициального k -дерева $T^{(i)}$ с i вершинами добавлением в него новой вершины j и таких дуг $(j, l_n), n=1, 2, \dots, k$, что вершины $l_n, n=1, 2, \dots, k$ принадлежат общей ориентированной ациклической k -кликке графа $T^{(i)}$.

Рассмотрим ориентированное симплициальное k -дерево $D=(V, A)$. Отметим свойства дерева D , непосредственно следующие из определения 1.

- Все максимальные ориентированные клики в D являются ациклическими ориентированными $k+1$ -кликками.
- Полустепень исхода $\deg^-(v) \leq k$ для любой вершины $v \in V(D)$.
- Мощность минимального сепаратора в D равна k .
- Количество дуг ориентированного k -дерева D равно

$$k \left(|V| - \frac{(k-1)}{2} \right).$$

- Количество $(k+1)$ -ориентированных клик в D равно $|V| - k$.
- Все вершины со степенью исхода $\deg^-(v) = k$ являются корнем некоторой $(k+1)$ ориентированной клики.
- Существует единственная вершина $v_0 \in V$ со степенью исхода $v_0 \in V$.

Эти свойства можно использовать при распознавании является ли ориентированным k -деревом представленный граф.

Для решения поставленной задачи (1) может быть использовано понятие дерева декомпозиции.

Определение 3. *Деревом декомпозиции ориентированного симплициального k -дерева $G=(V,A)$ будем называть дерево $T=(M,W)$, с множеством узлов $M=K \cup S$, где K – множество ориентированных $(k+1)$ -клик графа $G=(J,E)$, а $S=\{X \cap Z: X,Z \in K, |X \cap Z|=k\}$ – множество сепараторов на множестве K , и множеством ребер $W=\{[X,Y]: X \in K, Y \in S, |X \cap Y|=k\}$.*

Вершины дерева T названы узлами для избежания путаницы с вершинами исходного графа G . Узел $X \in K$ в дальнейшем будем называть «узлом-кликой». Поскольку каждое множество $Y \in S$ является сепаратором графа G [13] (то есть при удалении вершин, принадлежащих $Y \in S$, а так же всех смежных с ними ребер из графа G , увеличивается число компонент связности графа G), то соответствующий узел Y будем называть «узлом-сепаратором». Стоит заметить, что ребро $[X,Y] \in W$ существует только между «узлом-кликой» $X \in K$ и «узлом-сепаратором» $Y \in S$, и только тогда, когда $Y \subset X$ [13].

Алгоритм нахождения дерева декомпозиции для заданного орграфа D приведен далее.

Алгоритм KTreeRecognition

Исходные данные: Орграф $D=(V,A)$, представленный для каждой вершины v множеством вершин-преемников $A(v)=\{u \in V: (v,u) \in A\}$.

Результат:

Если $D=(V,A)$ – ориентированное симплициальное k -дерево, то определяются значение древесной ширины k и дерево декомпозиции $T=(K \cup S,W)$:

$$K = \bigcup_{\substack{v \in V: \\ \deg^-(v) \geq k}} X(v); \quad S = \bigcup_{\substack{X,Y \in K: \\ |X \cap Y|=k}} (X \cap Y);$$

$$W = \{[X,Y]: X \in K, Y \in S, |X \cap Y|=k\},$$

где $X(v)$ – $(k+1)$ -клика с корнем в вершине v .

Иначе возвращается $k=0$.

Шаг 1. Проверка.

Шаг 1.1. Для каждой вершины $v \in V$ найти полустепень исхода

$$\deg^-(v) = \left| \{(v,u) \in A(v)\} \right|,$$

полустепень захода

$$\deg^+(v) = \left| \left\{ (u, v) \in \bigcup_{u \in V} A(u) \right\} \right|.$$

Шаг 1.2. Найти вершину v_0 с минимальной полустепенью захода $m = \min_{v \in V} \deg^+(v)$. Если $m > 0$, вернуть $k = 0$.

Шаг 1.3. Вычислить верхнюю оценку древовидной ширины

$$\bar{k} = \min_{\substack{v \in V: \\ \deg^+(v)=0}} \deg^-(v).$$

Шаг 1.4. Вычислить нижнюю оценку древовидной ширины

$$\underline{k} = \left\lfloor \frac{2 \cdot |V| - 1 - \sqrt{(2 \cdot |V| - 1)^2 - 8 \cdot |A|}}{2} \right\rfloor.$$

Шаг 1.5. Если $\underline{k} > \bar{k}$, то вернуть $k = 0$.

Шаг 1.6. Если $\underline{k} \notin \mathbf{N}$, то вернуть $k = 0$, иначе положить $k = \underline{k}$.

Шаг 1.7. Вычислить количество узлов-клик в дереве декомпозиции $\tilde{N} = |V| - k$.

Шаг 1.8. Если $\tilde{N} = 1$, то вернуть $k = 1$, $K = \{X(v_0)\}$, $S = \emptyset$, $W = \emptyset$.

Шаг 2. Инициализация

Положить $K = S = \emptyset$. Построить множество $V_0 = \{v \in V : \deg^+(v) = 0\}$.

Шаг 3. Пока $V_0 \neq \emptyset$, выполнять шаги 3.1–3.5.

Шаг 3.1. Пусть $v \in V_0$; положить $V_0 = V_0 \setminus \{v\}$.

Шаг 3.2. Если $A(v) = \emptyset$, то перейти на шаг 3. Иначе найти в подграфе $D(\{v\} \cup A(v))$ множество всех $(k+1)$ -орклик $X(v) = \{X_i(v) : i = 1, 2, \dots, M_v\}$.

Шаг 3.3. Если множество $X(v)$ не покрывает подграф $D(\{v\} \cup A(v))$, то вернуть $k = 0$.

Шаг 3.4. Если $M_v = 1$, то единственный сепаратор, смежный узлу $X_1(v)$ равен $S_{1*}(v) = X_1(v) \setminus \{v\}$. Иначе сепараторы узлов $X_j(v)$ и $X_l(v)$, $1 \leq j, l \leq M_v$ - есть множества $S_{jl}(v) = X_j(v) \cap X_l(v)$.

Шаг 3.5. Для всех $u : (v, u) \in A(v)$ положить $\deg^+(u) = \deg^+(u) - 1$. Если $\deg^+(u) = 0$, то $V_0 = V_0 \cup \{u\}$.

Шаг 4. Вернуть множество узлов-клик K и множество узлов-сепараторов S дерева декомпозиции:

$$K = \bigcup_{v \in V} X(v), \quad S = \bigcup_{X, Y \in K} (X \cap Y).$$

Конец алгоритма.

Теорема. Если орграф $D = (V, A)$ является ориентированным k -деревом, представленным для каждой вершины $v \in V$ функциями полустепени захода $\deg^+(v)$, полустепени исхода $\deg^-(v)$ и списком исходящих дуг $A(v)$, то алгоритм *KTreeRecognition* находит численное значение его древовидной ширины k и дерево декомпозиции.

Методы решения

В постановке задачи на φ накладывается только условие однозначности (т.е. разные работы могут быть выполнены одним и тем же исполнителем), таким образом, задача является полуопределенной квадратичной задачей о назначениях, известной как дискретная задача Вебера.

Поставленная задача является обобщением задачи Вебера. Разработкой этой проблематики занимались Забудский Г.Г. [6], Панюков А.В., Шангин Р.Э. [8, 9, 11]. В работе [11] предлагается последовательный детерминированный алгоритм, находящий точное решение задачи для k -дерева. Алгоритм использует идею динамического программирования на основе дерева декомпозиции [10].

Заключение

Разрабатываемый алгоритм будет внедрен в создаваемое ИТ решение, разработка которого также будет выполнена в рамках заявляемого проекта. Решение будет представлять собой платформу для управления автопарком (таксопарком), позволяющую увеличить эффективность управления. Платформа направлена на решение следующих основных проблем: (1) сложности управления парком автомобилей при «ручном» регулировании процессов; (2) неоптимального распределения рабочего времени водителей (или периодов аренды); (3) необходимости организации контроля наличия необходимых документов каждую смену.

Разрабатываемая платформа позволит повысить эффективность управления парком автомобилей, позволит увеличить количество привлекаемых водителей и клиентов, сократить потери времени на передачу автомобиля, обеспечить прозрачность расчетов. Это будет достигаться за счет более эффективного бизнес-процесса организации работы в платформе, а также за счет применения разрабатываемого алгоритма.

Сейчас на ряде рынков намечается тренд на привлечение агрегаторами водителей такси напрямую, снижая таким образом количество «посредников» в виде таксопарков. Кроме того, начался рост сегмента бизнес-такси и аренды автотранспорта для бизнес-целей по типу каршеринга. В ближайшие пару-тройку лет ожидается изменение на рынке в части увеличения таксопарков с низким уровнем загрузки, которым необходимо будет каким-то образом загрузить имеющиеся ресурсы в виде автомобилей. А также появятся дополнительные сегменты на рынке, куда автопарки (таксопарки) смогут направить доступные ресурсы при условии

наличия удобных ИТ платформ, оптимизирующих уровень загрузки автомобилей.

Библиографический список

1. Лазарев, А.А. Теория расписаний. Методы и алгоритмы: монография / А.А. Лазарев. – Москва : ИПУ РАН, 2019. – 407 с.
2. Лазарев, А.А. Модели и методы решения задач теории расписаний/ А.А. Лазарев // Автомат. и телемех., 2014, № 7. С. 14–16.
3. Christofides, N., An Exact Algorithm for the Quadratic Assignment Problem on a Tree / N. Christofides, E. Benavent // Operations Research 37. – 1989. - No. 5, pp. 760–768.
4. Burkard, R.E. The Quadratic Assignment Problem/ R.E. Burkard, E. Cela, P.M. Pardalos, L.S. Pitsoulis // Du DZ., Pardalos P.M. (eds) Handbook of Combinatorial Optimization. Springer, Boston, MA. 1998. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0303-9_27
5. Панюков, А.В. О существовании целочисленного решения релаксированной задачи Вебера для древовидной сети / А.В. Панюков // Автомат. и телемех. – 2019. – № 7, с. 134–141.
6. Забудский, Г.Г. Полиномиальные алгоритмы решения квадратичной задачи о назначениях на сетях / Г.Г. Забудский, А.Ю. Лагздин, // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2010. – № 50(11). – С. 2052–2059.
7. Erdogan, G. Two classes of Quadratic Assignment Problems that are solvable as Linear Assignment Problems / G. Erdogan, G., B.C. Tansel // Discrete Optimization. – 2011. – 8:3. – P. 446–451. <https://doi.org/10.1016/j.disopt.2011.03.002>
8. Panyukov, A.V. Polynomial algorithms to finite Veber problem for a tree network/ A.V. Panyukov, B.V. Pelzwerger // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 1991. - 35:1. – P. 291–296. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(91\)90215-6](https://doi.org/10.1016/0377-0427(91)90215-6)
9. Панюков, А.В. Топологические методы решения задачи Штейнера на графе/ А.В. Панюков // Автомат. и телемех. – 2004. – № 3. – С. 89–99. <https://doi.org/10.1023/B:AURC.0000019376.31168.20>
10. Быкова, В.В. Структурная декомпозиция графа и ее применение для решения оптимизационных задач на разреженных графах / В.В. Быкова // Прикладная дискретная математика, Приложение. – 2014. – № 7. – С. 154–157.
11. Панюков, А.В. Точный алгоритм решения дискретной задачи Вебера для k-дерева / А.В. Панюков, Р.Э. Шангин // Дискретный анализ и исследование операций. – 2014. – 21:3. – С. 64–75.
12. Rose, D.J. Triangulated graphs and the elimination process / D.J. Rose // Journal of Mathematical Analysis and Applications. – 1970. – V. 32:3. – P. 597–609. [https://doi.org/10.1016/0022-247X\(70\)90282-9](https://doi.org/10.1016/0022-247X(70)90282-9)
13. Ibarra, L. The clique-separator graph for chordal graphs / L. Ibarra // Discrete Applied Mathematics. – 2009. – Vol. 157(8). – P. 1737–1749. <https://doi.org/10.1016/j.dam.2009.02.006>

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ЗАДАЧА ПРОТИВОБОРСТВА В ИГРАХ С ЛИНЕЙНЫМ НАИЛУЧШИМ ОТВЕТОМ

И.В. Петров

В работе исследуется теоретико-игровая модель взаимодействия экономических агентов на сети. В центре внимания находится управление структурой взаимодействия, т. е. элементами матрицы взаимодействия. Для противопоставления эффективности различных подходов к управлению, рассмотрена задача противоборства двух центров, преследующих противоположные цели.

Ключевые слова: теория игр, игры на сетях, сетевое управление.

Существует множество примеров использования сетевых отношений в задачах управления социально-экономическими системами. В работе [1] приведены следующие стратегии сетевых интервенций, каждая из которых имеет различные тактические альтернативы:

- индивидуальные (англ. individual) – идентификация ключевых участников сети, выбранных на основе некоторых сетевых характеристик;
- групповые (англ. segmentation) – сегментация сети, при которой вмешательство направлено на отдельные группы узлов;
- индукционные (англ. induction), при которых происходит возбуждение сети таким образом, что активируются новые взаимодействия между участниками – т.н. каскады, которые могут носить информационный/поведенческий и др. характер (подробнее смотрите, например, [2]);
- структурные (англ. alteration), при которых изменениям подвергаются связи между участниками и сеть взаимодействия в целом.

Ряд авторов [3, 4] выделяют институциональные интервенции, подчеркивая специфику вмешательства, направленного на изменение правил взаимодействия. Управляющие органы (или центр/центральный планировщик, англ. central planner), такие как руководители организаций, органы государственного управления, или поставщики технологий информационного взаимодействия (такие как компании-разработчики онлайн-социальных сетей, средств электронной коммуникации) могут изменять механизмы взаимодействия между участниками, устанавливать формальные или технические ограничения, регулировать затраты на создание или удаление участниками связей между ними.

В центре внимания данной работы находится управление структурой взаимодействия, т. е. элементами матрицы взаимодействия, благодаря чему центр также может добиваться требуемых ему результатов. Подход к исследованию можно представить следующим образом (рис. 1). Каждый участник сетевых отношений осуществляет некоторое действие a_i в расчете на то, чтобы получить наибольшую выгоду U_i . Благодаря этому стремлению агентов (стремлению максимизировать личную выгоду) и сетевому характеру экономических отношений, возникает динамика наилучших ответов участников (BR, англ. – best response), где в каждый момент времени агенты выбирают наилучшие ответы на действия своих соседей по сети. Результатом такой динамики является равновесие, характеризующиеся набором наилучших ответов $\mathbf{a}^* = \{a_i^*\}$.

Управляющий орган получает информацию о выигрышах участников и может повлиять на их действия, вообще говоря, в разные моменты времени и различными способами. Вследствие этого результаты взаимодействия агентов меняются, становятся более желательными для центра. Предметом управления, как было указано выше, могут являться различные элементы системы - действия агентов, их стимулы, структура взаимодействия (влияния) и другие характеристики [3].

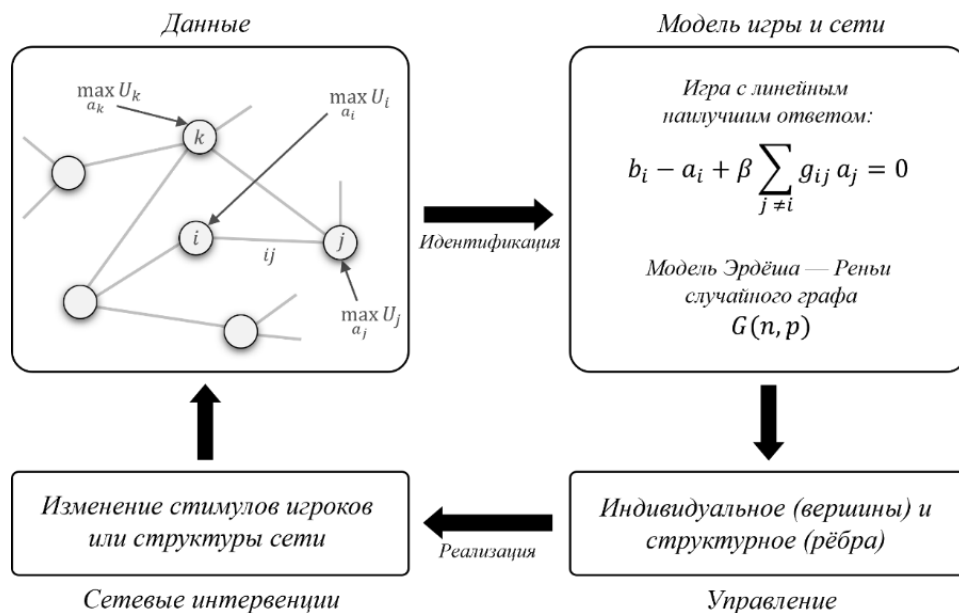


Рис. 1. Схематичное представление исследования структурного управления стратегическим взаимодействием агентов

Рассмотрим модель из класса линейно-квадратичных игр на графах [5]. Выигрыш игрока в данной модели включает выгоду от собственного действия и действий соседей, а также квадратичные издержки от принятого решения:

$$U_i = a_i \left(b_i + \beta \sum_{j \in N} g_{ij} a_j \right) - \frac{1}{2} a_i^2.$$

Здесь $a_i \in \mathbb{R}$ – действия игрока i , $b_i \in \mathbb{R}$ – предельный выигрыш, независимый от действий соседей (standalone marginal return), $\{g_{ij}\} = \mathbf{G} \in \{0,1\}^{N \times N}$ – матрица связей между агентами. Параметр β отражает характер зависимости от действий соседей: при $\beta > 0$ действия игроков комплементарны (strategic complements), при $\beta < 0$ действия соседей взаимозаменяют друг друга (strategic substitutes). Равновесие Нэша в игре существует и единственно если $\beta \rho(\mathbf{G}) < 1$ (где $\rho(\cdot)$ – спектральный радиус), а ответы игроков в равновесии в векторном виде можно представить как

$$\mathbf{a}^* = [\mathbf{I} - \beta \mathbf{G}]^{-1} \mathbf{b},$$

где \mathbf{I} – единичная матрица. Удобно ввести функцию общественного благосостояния (social welfare function) следующего вида:

$$W = \sum_{i \in N} U_i,$$

т.е. сумма выигрышей, полученных игроками в равновесии. Тогда задача управления состоит в максимизации данной функции при некоторых ограничениях. В данной работе, с целью противопоставления эффективности различных подходов, рассмотрена задача противоборства двух центров, преследующих противоположные цели (рис. 2). Оба центра одновременно получают информацию о равновесных ответах игроков. Один из центров, обладая некоторым бюджетом, стремится изменить функцию общественного благосостояния W посредством изменения целевых трансфертов $b \rightarrow \hat{b}$ [6], а второй центр стремится воспрепятствовать этому посредством изменения структуры связей $g \rightarrow \hat{g}_{ij}$.

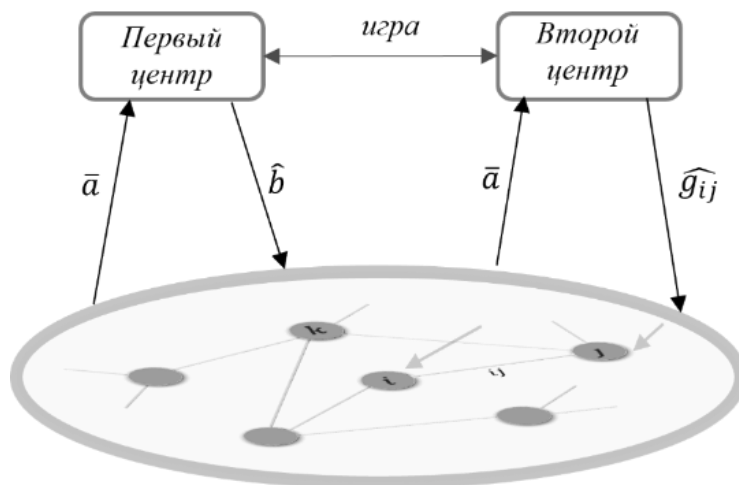


Рис. 2. Схематичное представление задачи противоборства двух центров в игре на сети

Для модели случайного графа Эрдеша – Реньи в работе показано, что, в отличие от структурного управления, эффективность целевых интервенций не зависит от величины сетевого эффекта β и пропорциональна имеющемуся бюджету: в явном виде найдено значение сетевого эффекта β^* , выше которого эффективность структурного управления превышает эффективность целевых трансфертов. Найдены оптимальные ответы центров в задаче противодействия (см. пример на рис 3.), а также области значений параметров игры, в которой затраты на противоборство посредством изменения структуры сети выше/ниже затрат на целевые трансферты.

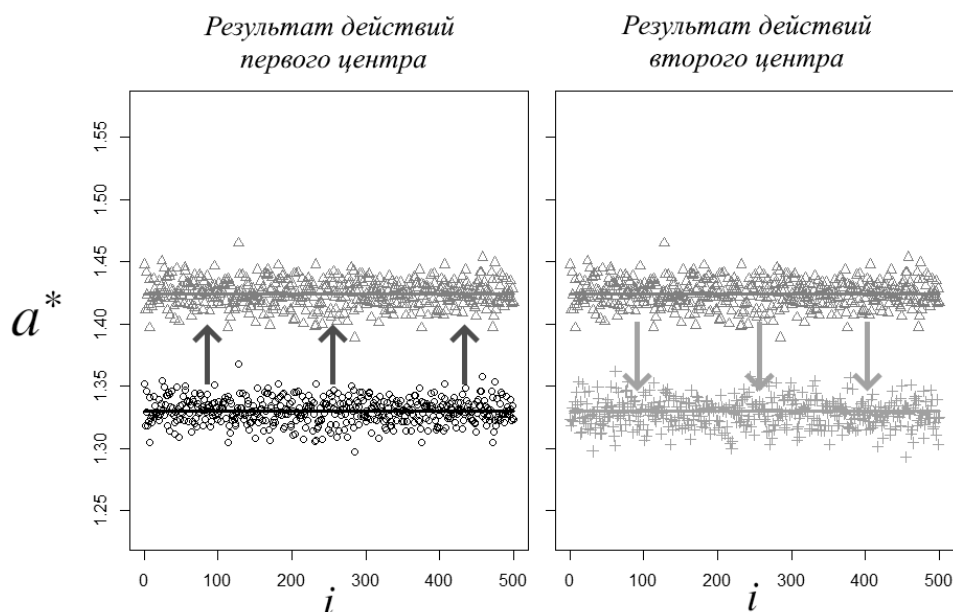


Рис. 3. Пример численного моделирования игры на сети из $N=500$ игроков, $p = 0.7$, $b = 1$, $\beta p = 0.25$. На рисунке представлен результат последовательных действий двух центров, отраженных в равновесных ответах игроков

Библиографический список

1. Valente, T.W. Network interventions / T.W. Valente. // Science. – 2012. – Vol. 337, No 6090. – P. 49–53.
2. Kempe, D. Maximizing the spread of influence through a social network / D. Kempe, J. Kleinberg, É. Tardos // Proceedings of the ninth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining. – 2003. – P. 137–146.
3. Губанов, Д.А. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства. 3-е изд., перераб. и дополн. / Д.А. Губанов, Д.А. Новиков, А.Г. Чхартишвили. – М.: МЦНМО, 2018. – 224 с.
4. Siciliano, M.D. Strategies of Network Intervention: A Pragmatic Approach to Policy Implementation and Public Problem Resolution through Network Science / M.D. Siciliano, T.A. Whetsel // arXiv preprint arXiv:2109.08197, 2021.

5. Ballester, C. Who's who in networks. Wanted: The key player / C. Ballester, A. Calvó-Armengol, Y. Zenou // *Econometrica*. – 2006. – Vol. 74, No 5. – P. 1403–1417.

6. Galeotti, A. Targeting interventions in networks / A. Galeotti, B. Golub, S. Goyal // *Econometrica*. – 2020. – Vol. 88, No 6. – P. 2445–2471.

ЗАДАЧА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ПО ОСТАНОВКЕ МАЯТНИКА С ПОДВИЖНЫМ ПОДВЕСОМ

А.П. Потанов

Исследована задача быстрогодействия по остановке однозвенного маятника с подвижной точкой подвеса, имеющей или не имеющей массу. Получен явный вид уравнений движения систем. С помощью принципа максимума Понтрягина получен явный вид оптимального по быстродействию управления системами.

Ключевые слова: задача быстрогодействия, принцип максимума Понтрягина, однозвенный маятник.

Введение. Задача управления маятником с подвижной точкой подвеса была рассмотрена при различных критериях оптимальности. В частности, в [1] был получен закон оптимального управления n -звенным маятником в линейном приближении около точки неустойчивого равновесия, соответствующий минимальному среднеквадратичному отклонению маятника от точки неустойчивого равновесия.

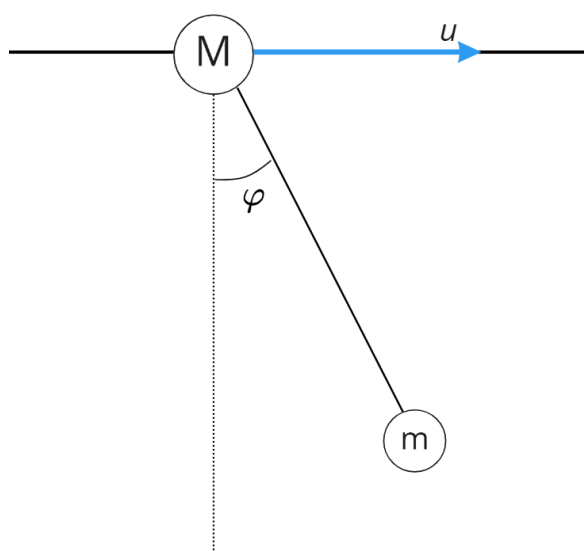


Рис. 1. Маятник с подвижной точкой подвеса

В [2] были получены уравнения движения n -звенного маятника на колесе. Также был получен закон управления для стабилизации такого маятника в неустойчивом положении равновесия, когда управляющим

воздействием является момент, приложенный к первому звену, для случая $n=1$. Решена задача быстрогодействия для однозвенного маятника на колесе при помощи принципа максимума Понтрягина. Различные задачи управления маятником на подвижной тележке вызывают особый практический интерес и были рассмотрены, например, в [4].

Целью настоящей работы является более подробное, чем в [2], исследование задачи быстрогодействия по остановке нелинейного однозвенного маятника на подвижной тележке.

Маятник с тяжелой точкой подвеса. Рассмотрим маятник с подвижной точкой подвеса (рис. 1). Пусть x – координата точки подвеса, m – масса груза на конце маятника, M – масса точки подвеса, l – длина маятника, а u – сила, приложенная к точке подвеса, под действием которой точка подвеса может перемещаться вдоль прямой. Координаты груза на конце маятника имеют вид

$$\begin{cases} x_m = l \sin \varphi + x, \\ y_m = l \cos \varphi. \end{cases}$$

Тогда функция Лагранжа этого маятника имеет вид:

$$\begin{aligned} L &= \frac{m}{2} (\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) + \frac{M\dot{x}^2}{2} + mgl \cos \varphi = \\ &= \frac{m}{2} (l^2 \dot{\varphi}^2 + 2\dot{x}\dot{\varphi} \cos \varphi + \dot{x}^2) + \frac{M\dot{x}^2}{2} + mgl \cos \varphi. \end{aligned}$$

Уравнение Лагранжа для обобщенной координаты φ :

$$ml^2 \ddot{\varphi} + ml \ddot{x} \cos \varphi + mgl \sin \varphi = 0.$$

Добавим управление, передвигающее точку подвеса маятника. Рассмотрим в начале приближение $m \ll M$. Также для удобства примем $M = 1$. Тогда получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} + \frac{\ddot{x}}{l} \cos \varphi + \frac{g}{l} \sin \varphi = 0, \\ \ddot{x} = u. \end{cases}$$

Подставляя \ddot{x} из второго уравнения в первое, получаем уравнение для φ :

$$\ddot{\varphi} = -\frac{u}{l} \cos \varphi - \frac{g}{l} \sin \varphi. \quad (1)$$

Обозначим $\omega = \dot{\varphi}$. Тогда уравнение (1) можно переписать в виде системы:

$$\begin{cases} \dot{\varphi} = \omega, \\ \dot{\omega} = -\frac{u}{l} \cos \varphi - \frac{g}{l} \sin \varphi. \end{cases} \quad (2)$$

Постановка задачи. Зададим начальные и терминальные условия:

$$\vec{x}(0) = \begin{pmatrix} \varphi(0) \\ \omega(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\vec{x}(T) = \begin{pmatrix} \varphi(T) \\ \omega(T) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Требуется найти закон управления $u(t)$, переводящий систему (2) из положения (3) в положение (4) при минимизации функционала

$$J(u) = \int_0^T dt \rightarrow \min.$$

Принцип максимума. Для поиска оптимального по быстродействию управления системой воспользуемся необходимым условием (принципом максимума Понтрягина). Функция Понтрягина системы (2):

$$H = \psi_1 \omega + \psi_2 \left(-\frac{u}{l} \cos \varphi - \frac{g}{l} \sin \varphi \right),$$

где ψ_i – сопряженные переменные.

Из принципа максимума получаем, что:

$$u = -\varepsilon \operatorname{sign} \{ \psi_2 \cos \varphi \}. \quad (5)$$

Уравнения для ψ_i :

$$\begin{cases} \dot{\psi}_1 = \psi_2 \left(-\frac{u}{l} \sin \varphi + \frac{g}{l} \cos \varphi \right), \\ \dot{\psi}_2 = -\psi_1. \end{cases} \quad (6)$$

Чтобы найти условия на ψ_i воспользуемся условием максимума:

$$\forall t \max_{|u| < \varepsilon} \{ H(x, t, u) \} = 1.$$

Тогда для моментов времени $t = 0$ и $t = T$ соответственно:

$$\begin{aligned} \psi_2(0) \left(\pm \frac{\varepsilon}{l} \cos \varphi_0 - \frac{g}{l} \sin \varphi_0 \right) &= 1, \\ \pm \psi_2(T) \frac{\varepsilon}{l} &= 1. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, чтобы найти закон движения системы (2), нужно решить систему ОДУ (6) с граничными условиями (7), где знак $+$ или $-$ выбирается в зависимости от $u(0)$ и $u(T)$, совместно с системой (2). Это можно сделать, например, методом пристрелки.

Численное моделирование. С помощью Julia получаем следующие результаты для случая $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$, $\varepsilon = 4$, $l = 1.5$ (рис. 2).

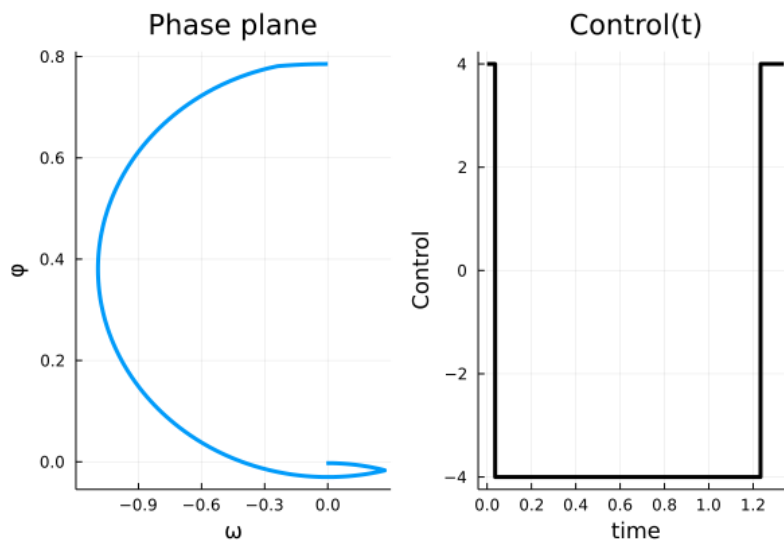


Рис. 2. Результаты численного моделирования

Маятник с подвижной точкой подвеса массы М. Пусть теперь точка подвеса маятника имеет ненулевую массу M . Аналогично предыдущему случаю:

$$\begin{cases} x_m = l \sin \varphi + x, \\ y_m = l \cos \varphi. \end{cases}$$

Функция Лагранжа такого маятника имеет вид:

$$\begin{aligned} L &= \frac{m}{2} (\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) + \frac{M}{2} \dot{x}^2 + mgl \cos \varphi = \\ &= \frac{m}{2} (l^2 \dot{\varphi}^2 + 2\dot{x}\dot{\varphi}l \cos \varphi) + \frac{M+m}{2} \dot{x}^2 + mgl \cos \varphi. \end{aligned}$$

Отсюда получаем систему уравнений Лагранжа:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} ml \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 ml \sin \varphi + \ddot{x}(m+M) = u, \\ \ddot{\varphi} + \frac{\ddot{x}}{l} \cos \varphi + \frac{g}{l} \sin \varphi = 0. \end{cases}$$

Выразим \ddot{x} из первого уравнения и подставим во второе. Обозначив $\frac{m}{m+M} = \mu < 1$, $m+M = \alpha$ получаем уравнение для φ :

$$\ddot{\varphi}(1 - \mu \cos^2 \varphi) + \dot{\varphi}^2 \mu \sin \varphi \cdot \cos \varphi + \frac{g}{l} \sin \varphi + \frac{u \cos \varphi}{\alpha l} = 0.$$

Обозначим $\omega = \dot{\varphi}$. Тогда последнее уравнение можно переписать в виде системы:

$$(8) \quad \begin{cases} \dot{\varphi} = \omega, \\ \dot{\omega} = \frac{1}{\mu \cos^2 \varphi - 1} \left(\omega^2 \mu \sin \varphi \cdot \cos \varphi + \frac{g}{l} \sin \varphi + \frac{u \cos \varphi}{\alpha l} \right) = 0, \end{cases}$$

Постановка задачи. Требуется найти закон управления $u(t)$, переводящий систему (8) из положения (3) в положение (4) при минимизации функционала:

$$J(u) = \int_0^T dt \rightarrow \min.$$

Принцип максимума. Вводя сопряженные переменные аналогично предыдущему случаю получаем функцию Понтрягина H :

$$H = \psi_1 \omega + \frac{\psi_2}{\mu \cos^2 \varphi - 1} \left(\omega^2 \mu \sin \varphi \cos \varphi + \frac{g}{l} \sin \varphi + \frac{u \cos \varphi}{\alpha l} \right).$$

Тогда из принципа максимума управление имеет вид:

$$u = \varepsilon \cdot \text{sign} \left\{ \frac{\psi_2 \cos \varphi}{\alpha l (\mu \cos^2 \varphi - 1)} \right\}.$$

Так как $0 < \mu < 1$, то знаменатель всегда < 0 . Тогда выражение для управления u можно упростить:

$$u = -\varepsilon \cdot \text{sign} \{ \psi_2 \cos \varphi \}. \quad (9)$$

Заметим, что вид управления (9) в случае с точкой подвеса массы M совпадает с видом управления (5) в случае с тяжелой точкой подвеса.

Проводя необходимые операции дифференцирования, получаем систему дифференциальных уравнений для ψ_i :

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\psi}_1 &= -\frac{2\psi_2\mu \sin \varphi \cos \varphi}{(1 - \mu \cos^2 \varphi)^2} \left(\omega^2 \mu \sin \varphi \cos \varphi + \frac{g}{l} \sin \varphi + \frac{u \cos \varphi}{\alpha l} \right) - \\ &\quad - \psi_2 \frac{\omega^2 \mu \cos 2\varphi + \frac{g}{l} \cos \varphi - \frac{u}{\alpha l} \sin \varphi}{\mu \cos^2 \varphi - 1}, \\ \dot{\psi}_2 &= -\psi_1 - \frac{\psi_2 \omega \mu \sin 2\varphi}{\mu \cos^2 \varphi - 1}. \end{aligned} \right.$$

Несмотря на аналогичный вид управления, уравнения движения системы в этом случае имеют значительно более сложный вид.

Используя условие максимума, получаем граничные условия:

$$\begin{aligned} \psi_2(0) &= \frac{\mu \cos^2 \varphi_0 - 1}{\frac{g}{l} \sin \varphi_0 \pm \varepsilon \frac{\cos \varphi_0}{\alpha l}}, \\ \psi_2(T) &= \pm \frac{\alpha l}{\varepsilon} (\mu - 1). \end{aligned}$$

Численное моделирование. С помощью Julia получаем следующие результаты при $l = 1.5$, $m = 1.5$, $M = 3$ (рис .3–6).

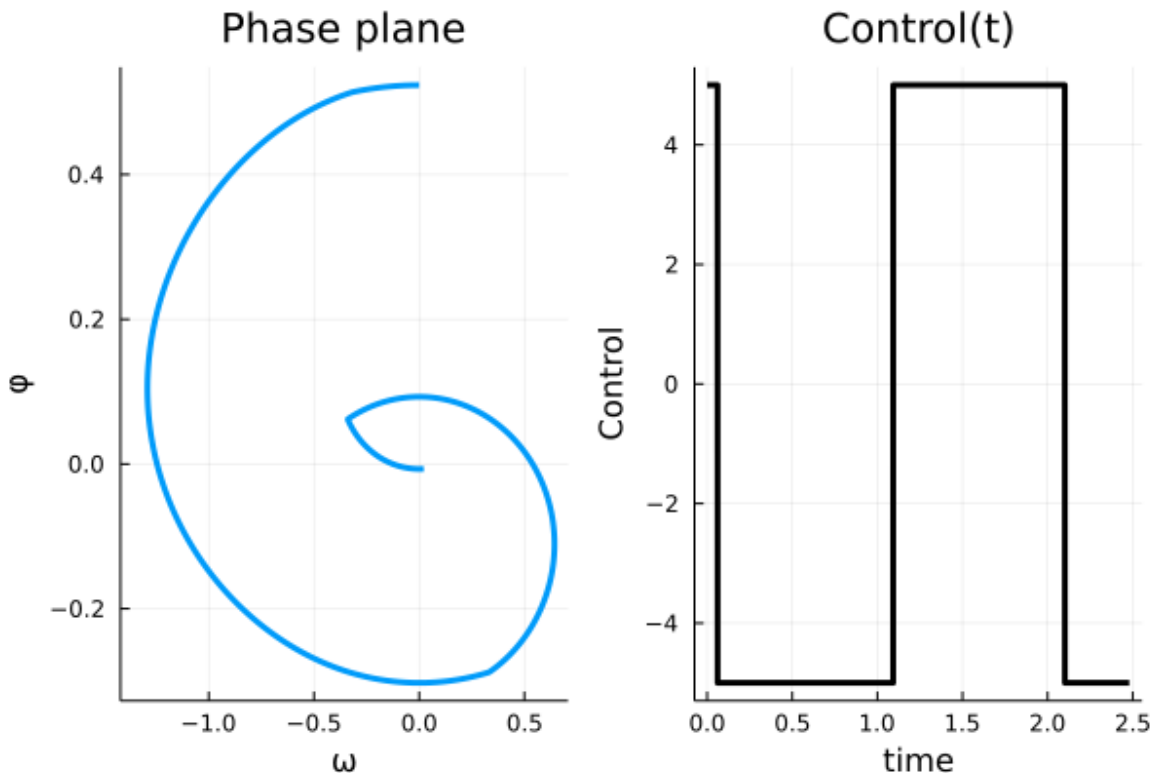


Рис. 3. $\varphi_0 = \frac{\pi}{6}$, $\varepsilon = 5$, $T \approx 2.46$

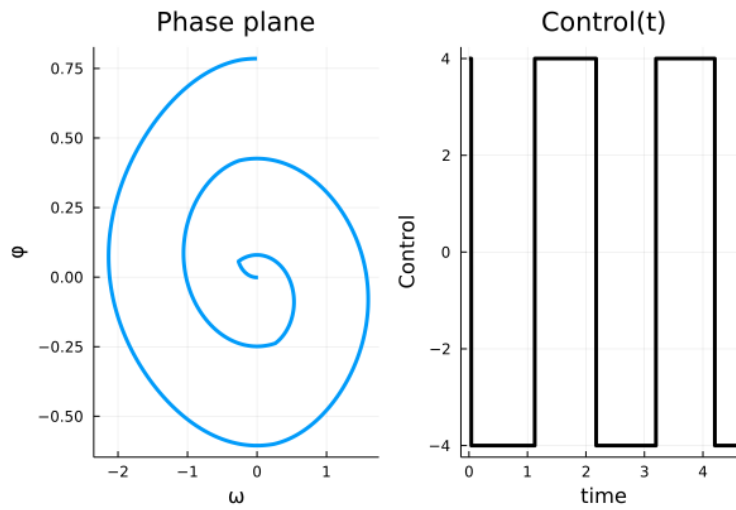


Рис. 4. $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$, $\varepsilon = 4$, $T \approx 4.6$

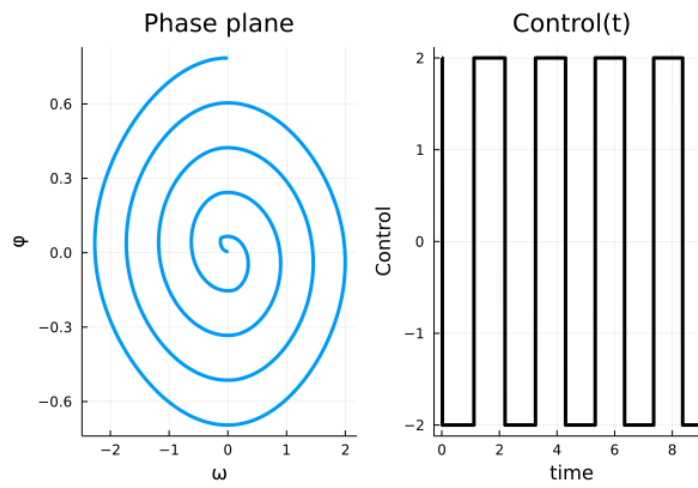


Рис. 5. $\varphi_0 = \frac{\pi}{4}$, $\varepsilon = 2$, $T \approx 9$

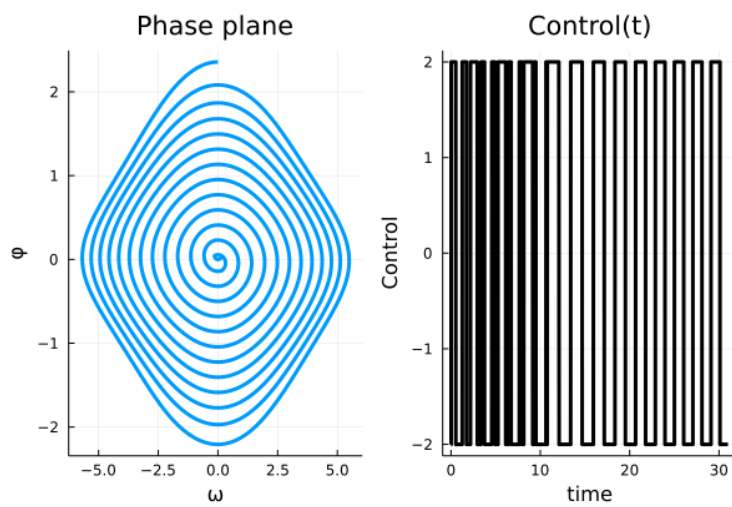


Рис. 6. $\varphi_0 = \frac{3\pi}{4}$, $\varepsilon = 2$, $T \approx 31$

Заключение. В данной работе была подробно исследована задача быстрогодействия по остановке однозвенного нелинейного маятника с подвижной точкой подвеса в виде тележки. Получен явный вид оптимального по быстродействию управления системой.

Изучая результаты работы, можно заметить, что, например, на рис.3-5, закон управления имеет вид, схожий с видом периодической функции.

В [5] был исследован частный случай задачи быстрогодействия по остановке одномерного нелинейного маятника, и было показано, что оптимальное управление имеет вид периодической функции. Было также доказано, что при определенных условиях движение в системе является изохронным.

Возможно, в рассмотренном в данной работе случае также имеет место изохронность движения системы.

Также большой, в том числе практический, интерес представляет собой задача оптимального управления n -звенным маятником на тележке. Однако в общем виде задача является достаточно сложной, поэтому в дальнейшем работа будет посвящена исследованию частного случая такого маятника при $n = 3$.

Библиографический список

1. Манитита, Л.А. Оптимальный синтез в задаче управления n -звенным перевернутым маятником на движущемся основании / Л.А. Манита, М.И. Рожнина // СМФН. – 2015. – Т. 56. – С. 129–144
2. Мартыненко, Ю.Г. Управляемый маятник на подвижном основании / Ю.Г. Мартыненко, А.М. Формальский // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2013. – №1. – С. 9–23.
3. Основы теории управления. – М.: Физматлит, 2007. – 504 с.
4. Ананьевский, И.М. Управление пространственным движением многозвенного перевернутого маятника с помощью момента, приложенного к первому звену / И.М. Ананьевский, Н.В. Анохин // Прикладная математика и механика. – 2014. – Т. 78. – №6. – С. 755–765.
5. Галяев, А.А. Задача оптимального управления осциллятором с целью обнуления его энергии при ограничении на управляющее воздействие / А. А. Галяев // Автоматика и телемеханика. – 2009. – № 3. – С. 24–33.

ПРИМЕНЕНИЕ ОЗЕРА ДАННЫХ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ И МАТЕРИАЛОВ

В.А. Починская, Д.В. Топольский

Представлена технология управления большими системами в области фундаментальных основ синтеза и эксплуатации перспективных материалов. Рассмотрена структура озера данных для реализации технологии цифровых двойников химических соединений и материалов, созданная на основе анализа баз данных цифровых моделей, содержащих информацию о структуре и свойствах химических соединений и материалов. Исходя из специфики объектов, базовой принята технология озера данных, позволяющая хранить и обрабатывать упорядоченные и неупорядоченные данные.

Ключевые слова: большие данные, цифровые двойники, озеро данных, искусственный интеллект, синтез материалов.

Создание и внедрение в современную промышленность технологии цифровых двойников (Digital Twins), представляющую собой виртуальную модель сложных систем (например, технических и природных объектов), является ключевым направлением развития современных информационных технологий [1]. Приоритетной становится задача применения интеллектуальных программных комплексов, оптимизирующих процессы сбора, хранения и обработки информации методами интеллектуального анализа и машинного обучения, в целях роста эффективности производственных процессов [2].

В современной аналитической химии используется и непрерывно генерируется огромное количество данных, затрудняя процесс моделирования и обработки ввиду большой размерности и разрозненности выходных файлов. Данный факт говорит о необходимости находить инновационные подходы к обработке данных в больших системах [3].

Основным подходом является наличие единой модели предметной области, точно описывающей данные и имеющей способы управления этими данными. Говоря о больших системах, одним из распространенных способов представить такую модель является построение озера данных, отвечающего за сбор, обработку, анализ и предоставление этих данных системам-потребителям (подсистемам).

Отличительной особенностью озера данных является то, что оно привлекает больше внимания со стороны бизнеса, а не академических исследовательских областей. Однако вместе с увеличивающимся объемом

данных вычислительные мощности современных компьютеров растут экспоненциально, что способствует активному внедрению инновационных технологий работы с большими данными.

Современные научно-исследовательские организации давно стремятся создать единую модель данных, которая могла бы не только автоматизировать, моделировать, визуализировать те или иные процессы, но также структурировать данные для их последующей аналитики, что непросто по причинам, приведенным ниже:

- данные не структурированы, так как получены из различных источников и имеют разные форматы, следовательно, может не существовать единой и полной модели для исследуемого объекта или моделируемого процесса;

- различные аппаратно-программные комплексы могут обрабатывать объекты на основе конкретных целей, и выходные данные могут соответствовать или не соответствовать ожидаемым процессам, например, давать неполную картину результатов моделирования ввиду изначально ограниченного набора параметров;

- различные аппаратно-программные комплексы могут иметь разные схемы доступа и хранилища структуры для каждого объекта.

Решением данных проблем является внедрение озера данных (Data Lake). Озеро данных может представлять объект в полном объеме на основе информации, полученной из различных систем, которым принадлежат эти данные.

Материаловедение и химический анализ в последнее время открывают новые перспективы для изучения и понимания природы и состава вещества [4]. Объем данных, получаемых от аналитических приборов, увеличивается с каждым годом, однако большие данные, хранящиеся в хранилищах предприятий и научных центров, не всегда структурированы, что затрудняет процесс аналитики и прогнозирования.

Исходя из вышесказанного, для построения концептуальной модели цифрового двойника необходимо [3]:

- определить структуру озера данных, с учетом специфики и потребностей в области синтеза и эксплуатации перспективных материалов;

- адаптировать технологию цифровых двойников применительно к выбранной предметной области;

- определить подходящие инновационные технологии и цифровые инструменты для реализации технологии цифрового двойника химических соединений и материалов.

Под цифровым двойником химического материала или соединения будем понимать единую постоянно обновляющуюся модель, применяемую для оптимизации исследовательской работы в области материаловедения и

аналитической химии [3]. Целью использования данной технологии является перенос характеристик химических объектов и процессов в цифровое пространство с их последующим анализом.

Ниже приведена схема структуры озера данных:

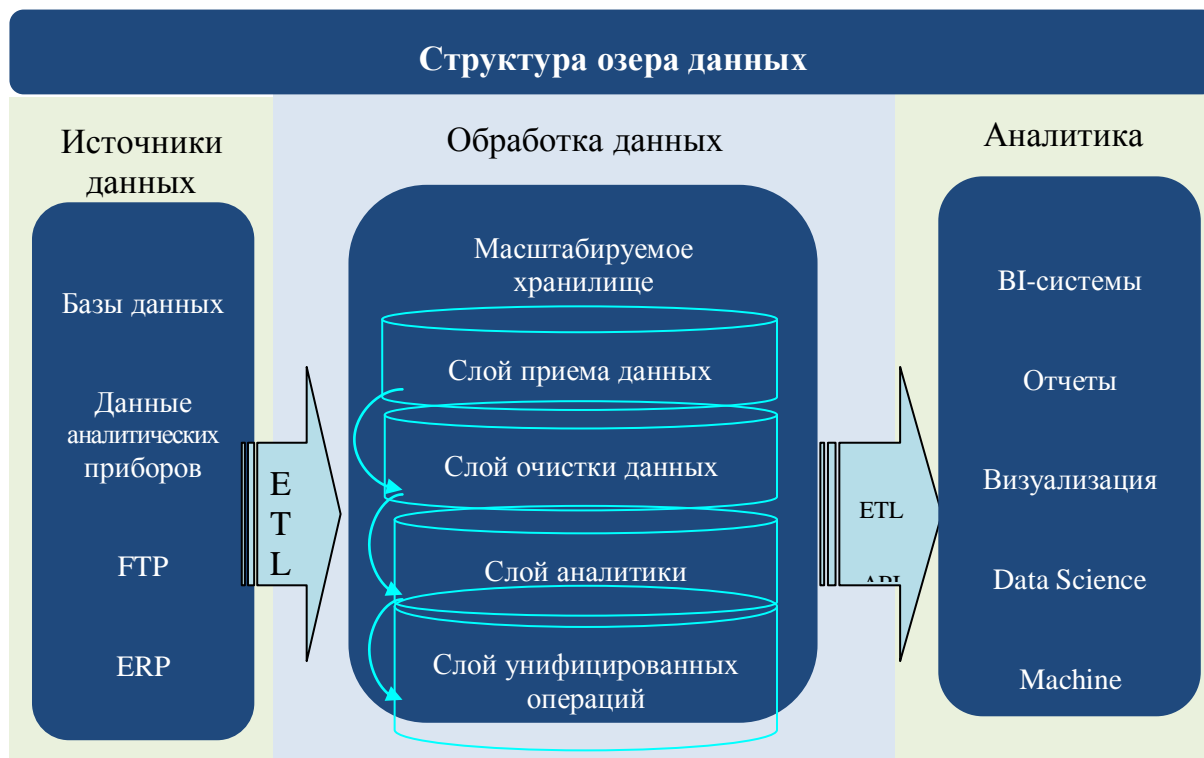


Рис. 1. Схема структуры озера данных

Источником служат базы данных для цифровых, содержащие информацию о химической структуре и свойствах химических соединений и материалов и данные аналитических приборов лаборатории.

Таким образом, цифровой двойник реализует функции прогнозирования, моделирования и оптимизации процессов поиска, хранения, доступа к имеющимся структурированным и неструктурированным данным озера данных [3].

Реализацию цифровых двойников химических соединений и материалов предлагается осуществлять с помощью внедрения инновационных технологий, среди которых суперкомпьютерные вычисления и искусственный интеллект, осуществляющие прогностическую функцию и реализующий процесс моделирования сложных физико-химических процессов [4], и высокопроизводительные вычисления для оптимизации процесса моделирования [3].

Рассмотрим ключевые компоненты цифрового двойника [5], адаптированные к специфике химических соединений и материалов, в частности применительно к молекулярной динамике и кристаллографии:

1. Совокупность передовых (best-in-class) технологий в области материаловедения и аналитической химии:

$$S_{bic} = \sum_{i=1}^n a_i T_i, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1, \quad (2)$$

где S_{bic} – сумма best-in-class технологий мирового уровня,

T_i – best-in-class технология, применяемая в данной области знаний,

a_i – весовой коэффициент вклада i -ой best-in-class технологии T_i при условии выполнения равенства (2).

2. Системный инжиниринг на основе моделей для последующего проектирования сложных больших систем, таких как физико-химические процессы;

3. Многоуровневая матрица M_{DT} целевых показателей, предназначенная для отслеживания корреляции компонентов, соединений, а также для корректировки заданных параметров в случае нарушения или значительных отклонений прогнозных и фактических данных в процессе реализации проекта:

$$\{M_{DT}: M_{DT}^{(0)}, M_{DT}^{(1)}, \dots, M_{DT}^{(N_M)}\}, \quad (3)$$

$$\{MM: MM^{(1)}, MM^{(2)}, \dots, MM^{(N_{MM})}\}, \quad (4)$$

где MM – семейство взаимоувязанных математических моделей физико-химических процессов и соединений.

После проведения натурных испытаний по достижении балансировки конфликтующих целевых показателей и при удовлетворении ресурсным ограничениям получаем матрицу $M_{DT}^{(i)}$, которая соответствует цифровому двойнику химического процесса или материала.

4. Виртуальные испытания.

В процессе моделирования сложных химических процессов, например, для молекулярного моделирования необходимо произвести тысячи запусков виртуальных испытаний (ВИ), представленных в матрице $M_{DT}^{(N_M)}$:

$$\{VI: VI^{(1)}, VI^{(2)}, \dots, VI^{(N_{VI})}\}. \quad (5)$$

Описанные выше компоненты положены в основу создания цифрового двойника, что способствует сокращению числа бесполезных данных, повышается скорость обработки и корректировки, приводя к трансформации цифрового двойника и его дальнейшему совершенствованию. Приведенная технология обеспечивает высокое качество восстановления данных за счет автоматизации сравнительного анализа априорных данных и апостериорных значений, получаемых с аналитических приборов, что увеличивает точность прогнозирования [2].

Таким образом, произведен анализ best-in-class технологий мирового уровня T_i по работе баз данных для цифровых моделей, содержащих информацию о химической структуре и свойствах химических соединений и материалов, разработан прототип цифрового паспорта химического

соединения или материала, что легло в основу семейства матриц M_{DT} . Результаты виртуальных испытаний (ВИ) хранятся как цифровые модели многокомпонентных соединений и молекулярных кристаллов, образуя множество подсистем большой системы – цифрового двойника.

В результате разработан прототип платформы и элементы комплекса программного обеспечения, позволяющего реализовывать поиск, создавать и хранить взаимосвязи между данными и информацией, содержащейся в файлах уже имеющихся цифровых моделей многокомпонентных химических соединений и материалов, полученных методами молекулярной динамики, квантово-химическими методами и средствами рентгено-дифракционного эксперимента.

Заключение. В статье представлена структура озера данных как инновационного решения для управления данными в больших системах: цифрового двойника химических соединений и материалов, созданного на основе анализа работы баз данных для цифровых моделей, содержащих информацию о химической структуре и свойствах химических соединений и материалов.

Работа с большими неструктурированными данными осуществляется через Data Lake и IoT, что позволяет хранить и быстро обрабатывать упорядоченные и неупорядоченные данные, полученные как из первичных источников данных (результаты работы аналитических приборов), так из уже имеющихся файлов, прогнозировать и моделировать физико-химические процессы, производить аналитику больших данных.

Библиографический список

1. Указ Президента Российской Федерации "О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 – 2030 годы" от 09.05.2017 г. № 203 // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2017.
2. Воробьев, А.В. Концепция информационного пакетного взаимодействия в многоуровневой системе цифровых двойников / А.В. Воробьев // Известия Саратовского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2021. – №4.
3. Семенов, П.В. Концептуальная модель реализации технологии цифровых двойников для предприятий нефтегазового комплекса / П.В. Семенов, Р.П. Семишкур, И.А. Дяченко // Газовая промышленность. – 2019. – №7 (787).
4. Мильман, Б.Л. Большие данные в современном химическом анализе / Б.Л. Мильман, И.К. Журкович // Журнал аналитической химии. – 2020. – Т. 75. – № 4. – С. 316-326.
5. Прохоров, А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТРИК В ЗАДАЧЕ МИНИМИЗАЦИИ ВРЕМЕННОГО СМЕЩЕНИЯ ДЛЯ ОДНОГО ПРИБОРА

Н.И. Проворченко, Д.В. Лемтюжникова

Рассматривается метрический подход для задачи минимизации максимального временного смещения. Метод позволяет строить решения задачи с гарантированной погрешностью за полиномиальное время. В ходе эксперимента сравнивается применение метода в связке с различными алгоритмами, дающими точное решение задачи в особых случаях. Делается вывод о зависимости средней абсолютной погрешности получаемого решения от размерности задачи и используемого полиномиального алгоритма.

Ключевые слова: дискретная математика, задача минимизации временного смещения, метрики, аппроксимация целевой функции.

Введение. Большинство задач теории расписаний NP-трудны в сильном смысле [1], с некоторыми полиномиально разрешимыми подклассами примеров. Из-за этого на практике зачастую невозможно найти точное решение задачи в силу большого объема входных данных. Поэтому для решения задачи необходимо строить эвристики, или схемы аппроксимации.

Рассматривается метрический подход к решению задач расписаний, представленный А.А. Лазаревым в [2]. Идея этого подхода состоит в использовании полиномиально разрешимых подклассов задачи (в общем случае NP-трудной) для получения решения для произвольного примера с гарантированной погрешностью за полиномиальное время. Пример задачи представляется как точка в многомерном пространстве. На этом пространстве вводится метрика, определяемая как оценка разности значений целевой функции двух примеров, к которым применено одно и то же расписание. Пусть существуют два расписания, являющиеся оптимальными для соответствующих примеров. Тогда можно построить оценку абсолютной погрешности для случая, когда расписание одного примера используется в качестве решения для другого вместо реального оптимального решения. Рассмотрим данный подход в применении к задаче минимизации временного смещения.

Постановка задачи и полиномиально разрешимые классы. Задача минимизации временного смещения на одном приборе ставится следующим образом. На одном приборе требуется обслужить требования из множества $N = \{1..n\}$. Каждое требование j характеризуется тремя параметрами: r_j, p_j, d_j , где r_j – минимально возможное время начала обслуживания, p_j –

продолжительность обслуживания, d_j - директивный срок. Через π обозначается совокупность моментов начала обслуживания требования j s_j , или иначе говоря, расписание. Вводится функция $L_j(\pi) = C_j(\pi) - d_j$, где $C_j(\pi)$ – момент завершения обслуживания требования j в расписании π . Требуется найти такое допустимое расписание π^* , на котором достигается минимум целевой функции $L_{max}(\pi) = \max_{j \in N} L_j(\pi)$. Расписание π^* называется оптимальным.

Рассмотрим использование метрик и полиномиально разрешимых подклассов задачи для построения приближенного решения. Выделим следующие подклассы задачи: класс Лазарева, класс Хогевена, класс Джексона, класс Симонс.

Класс Джексона [3] определяется как класс примеров, в которых $r_j = r$ для $j \in N$. В качестве метрики для данного класса будем использовать функцию

$$\rho_J(A, B) = \max_{j \in N} r_j^A - \min_{j \in N} r_j^A.$$

Класс Лазарева [4] определяется как класс примеров, для которых выполняется соотношение $d_j \leq d_i \leftrightarrow d_j - r_j - p_j \geq d_i - p_i - r_i$ для всех $i, j \in N$. В качестве метрики для данного класса будем использовать функцию:

$$\rho_L(A, B) = \max_{i, j \in N} \rho_{ij}^L(A), \text{ где } \rho_{ij}^L(A) = \min_{i, j \in N} \{d_i - d_j, d_i - p_i - r_i - (d_j - r_j - p_j)\}.$$

Класс Хогевена [5] определяется как класс примеров, для которых выполняется соотношение $d_j - p_j - A \leq r_j \leq d_j - A$ для $j \in N$, где A - некоторая константа. В качестве метрики для данного класса будем использовать функцию:

$$\rho_H(A, B) = \max_{i, j \in N} \rho_{ij}^H(A), \text{ где } \rho_{ij}^H(A) = d_j - r_j - p_j - d_i + r_i.$$

Класс Симонс [6] определяется как класс примеров, в которых $p_j = p$ для $j \in N$. В качестве метрики для данного класса будем использовать функцию:

$$\rho_S(A, B) = \max_{j \in N} p_j^A - \min_{j \in N} p_j^A.$$

Для рассматриваемых классов ближайший по метрике пример можно построить путем решения задачи линейного программирования:

$$\begin{cases} (x_d - y_d) + (x_r - y_r) \rightarrow \min, \\ y_r \leq r_j^A - \delta \leq x_r, j \in N, \\ y_p \leq r_p^A - \delta \leq x_p, j \in N, \\ y_d \leq r_d^A - \delta \leq x_d, j \in N, \\ AR^C + BP^C + CD^C \leq H, \end{cases}$$

где A, B, C, R, P, D, H – матрицы, подробно определенные в [2].

Вычислительные эксперименты. Проведен ряд исследований для оценки эффективности метрического подхода в применении к исследуемой задаче. Сгенерировано по 500 примеров размерностей $n = \{2,4,6 \dots 100\}$, следуя процедуре генерации, приведенной в [2]. Данная процедура генерирует примеры таким образом, что точки $\{r_j, p_j, d_j \forall j \in N\}$ оказываются равномерно распределены на $3n$ -мерной единичной сфере. Для решения сгенерированных примеров последовательно применен метрический подход и дающий точное решение алгоритм Карлье, основанный на эвристике, позволяющий оценить практическое значение абсолютной погрешности. Для решения примера с помощью метрического подхода находится полиномиально разрешимый пример, минимизирующий значение метрической функции. Находится оптимальное решение π_B^* полиномиально разрешимого примера с помощью соответствующим алгоритмом. Согласно метрическому подходу найденное расписание является также и приближенным решением для исходного примера А со значением целевой функции $L_{max}^A(\pi_B^*)$, которое сравнивается со значением целевой функции оптимального решения $L_{max}^A(\pi_A^*)$. Абсолютное значение разности между этими значениями является абсолютной погрешностью.

Проведено сравнение полученного на практике значения абсолютной погрешности с ее теоретической верхней оценкой (то есть, со значением метрики), которое определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{L_{max}^A(\pi_B^*) - L_{max}^A(\pi_A^*)}{\rho(A, B)}.$$

Полученные средние значения α для классов Джексона, Лазарева и Хогевена и соответствующего набора тестовых примеров показаны на рис. 1. Они ведут себя похожим образом - быстро растут и стабилизируются при $n=10-12$. Причем значения α для классов Джексона и Лазарева стабилизируются в районе 55% и практически не отличаются друг от друга, а значение α для класса Хогевена на больших размерностях заметно ниже двух других алгоритмов - стабилизируется он в районе 43%.

Проведено исследования зависимости значения верхней оценки абсолютной погрешности от размерности n , которое определяется следующим образом:

$$\hat{\rho} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i(A, B).$$

Полученные значения $\hat{\rho}$ для классов Джексона, Лазарева и Хогевена и соответствующего набора тестовых примеров показаны на рис. 2. Верхняя оценка абсолютной погрешности увеличивается с ростом n . Можно заметить, что для класса Лазарева рост оценки погрешности идет с гораздо меньшей скоростью по сравнению с другими классами.

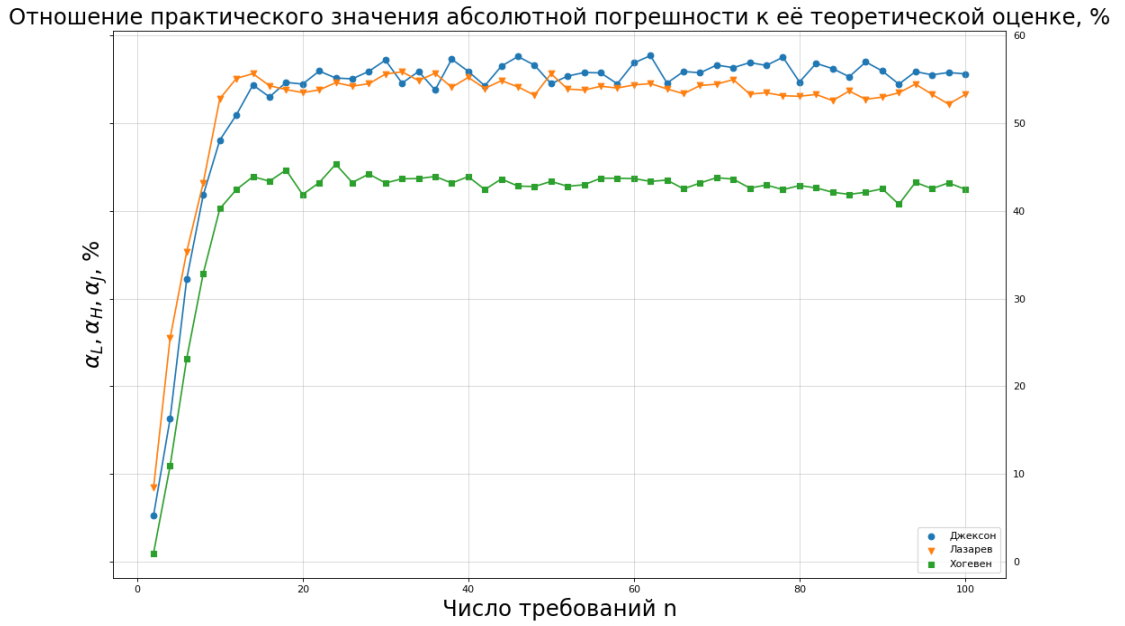


Рис. 1. Среднее отношение практического значения абсолютной погрешности к теоретической оценке

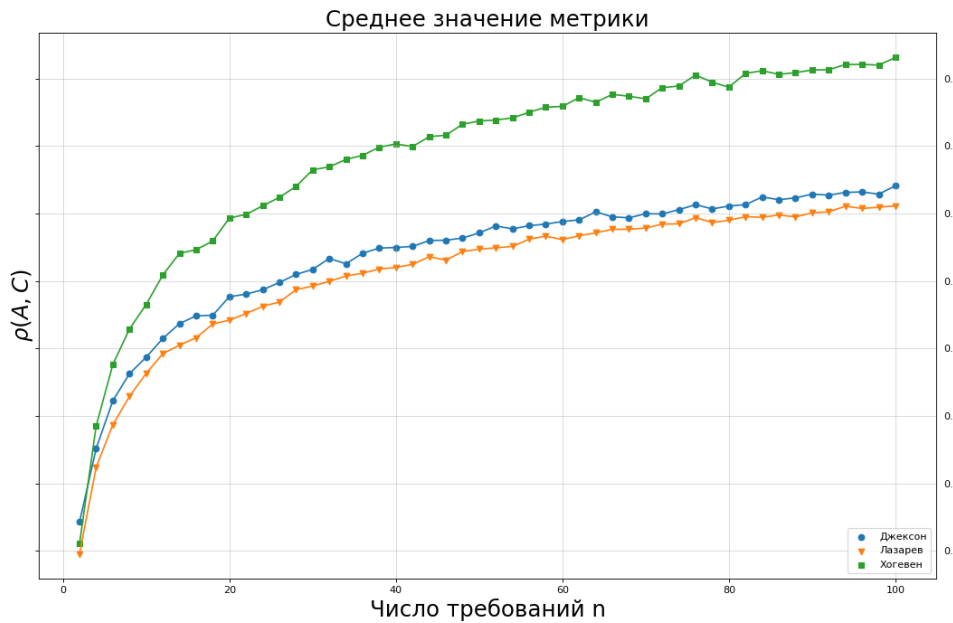


Рис. 2. Зависимость среднего значения абсолютной погрешности от размерности n

Заключение. В работе рассмотрено применение метрического подхода к задаче минимизации временного смещения. Приведены метрические функции для каждого из рассматриваемых полиномиальных классов. Построены примеры задач на основе нормального распределения.

Проведены испытания метрического подхода на сгенерированных данных. Показана зависимость значения средней абсолютной погрешности найденного решения от размерности n . В дальнейшем планируется расширить применение метрического подхода для задач с несколькими приборами.

Библиографический список

1. Лазарев, А.А. Парето-оптимальное множество NP-трудной задачи минимизации максимального временного смещения / А.А. Лазарев // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2006. – № 6. – С. 103–110.
2. Лазарев, А.А. Теория расписаний. Методы и алгоритмы / А.А. Лазарев. – М.: ИПУ РАН, 2019. – 408 с.
3. Jackson, J.R. Scheduling a production line to minimize maximum tardiness / J.R. Jackson. – Los Angeles, CA: University of California, 1955.
4. Lenstra, J.K. Complexity of machine scheduling problems / J.K. Lenstra, A.H.G.R. Kan, P. Brucker // Annals of discrete mathematics. – 1977. – Vol. 1. – P. 343–362.
5. Hoogeveen, J. Minimizing maximum promptness and maximum lateness on a single machine. / J. Hoogeveen // Mathematics of Operations Research. – 1996. – Vol 1. – P. 100–114.
6. Simons, B. A fast algorithm for single processor scheduling / B. Simons // 19th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. – IEEE, 1978. – P. 246–252.

ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОЕ ПРИСОЕДИНЕНИЕ В ЗАДАЧЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СООБЩЕНИЙ В СЛУЧАЙНОМ ГРАФЕ

М.С. Рыжов

В работе исследуется распространение сообщений в динамически меняющемся графе. Выбрав предпочтительное присоединение с равномерным удалением узлов в качестве модели эволюции графа, исследуется необходимое количество шагов алгоритма передачи сообщений для доставки сообщения до заданного числа узлов.

Ключевые слова: случайные графы, предпочтительное присоединение, эволюция графа, распространение сообщений.

Введение. Задача распространения сообщений имеет важное применение в задачах распределенных вычислений [1, 5], а также в исследовании распространении слухов и информации в социальных системах [3]. В прошлой работе [4] было проведено исследование экстремального индекса сообщества узлов и минимального времени распространения сообщения до одного узла до всех остальных узлов ненаправленного графа. Также в [8] исследовалась модификация алгоритма SPREAD для передачи одного сообщения на заданное количество узлов ненаправленного графа и приведено доказательство верхней границы числа шагов модифицированного алгоритма, необходимое для доставки одного сообщения заданному количеству узлов.

В текущей работе исследуется распространение сообщения в направленном графе, который эволюционирует согласно методу предпочтительного присоединения (ПП) [2, 6, 7]. Новизна такой задачи заключается в том, что распространение сообщения происходит во время добавления новых узлов и связей. Также исследуется влияние удаления узлов в процессе развития графа на конечный результат, поскольку могут быть удалены узлы с сообщением.

Статья организована следующим образом. В следующем разделе представлен обзор и постановка задачи распространения информации. Далее представлен метод эволюции графа и главный результат о времени распространения одного сообщения. В конце работы приводится итоговое заключение о полученном результате.

Задача распространения сообщений. Опишем алгоритм распространения, предложенный в [1, 5] для неориентированного графа $G=(V, E)$, V и E – это наборы узлов и ребер графа соответственно. Пусть $k \geq 0$ обозначает номер шага алгоритма, по которому не более чем один

узел может получить сообщения, связываясь с другим узлом. Изначально $k = 0$.

В случае полной передачи сообщений, при котором каждый узел может доставить свое сообщение до всех остальных узлов с вероятностью $1 - \delta \in (0, 1)$, вводится необходимое количество тиков

$$K(\delta) = \inf \{k \geq 0 : \sum_{i=1}^n P(\{S_i(k) \neq V\}) \leq \delta\}, S_i(k)$$

обозначает набор узлов, которые получили сообщение m_i от узла i на момент тика часов k . Передача сообщений осуществлялась с помощью алгоритма SPREAD [1,5], для которого алгоритма доказывается, что для любого $\delta \in (0, 1)$, $K(\delta) = O(n \frac{\log(n) + \log(\delta^{-1})}{\Phi(G)})$, $\Phi(G), 0 \leq \Phi(G) \leq 1$ - это

проводимость графа или изопериметр ненаправленного графа.

Предпочтительное присоединение. Линейная модель предпочтительного присоединения [2, 6, 7] использует в качестве начального направленного графа G_0 граф с N_0 узлами и k_0 связями. Для неотрицательных параметров α, β, γ , $\alpha + \beta + \gamma = 1$ и $\delta_{in}, \delta_{out}, r \in [0, 1]$, модель строит растущую последовательность направленных графов $G(k) = (V(k), E(k))$, где $V(k)$ и $E(k)$ - множества узлов и связей. На шаге эволюции $k > 0$ граф $G(k)$ получается из графа $G(k-1)$ добавлением связи по одной из следующих схем:

- с вероятностью α создается новый узел v и исходящая из него связь в существующий узел w , который выбирается с вероятностью

$$(P_\alpha)_{v,w} = \frac{I_{k-1}(w) + \delta_{in}}{k-1 + \delta_{in} N(k-1)};$$

- с вероятностью β создается новая связь исходящая из узла v и входящая в w , пара узлов выбирается с вероятностью

$$(P_\beta)_{v,w} = \left(\frac{I_{k-1}(w) + \delta_{in}}{k-1 + \delta_{in} N(k-1)} \right) \left(\frac{O_{k-1}(v) + \delta_{out}}{k-1 + \delta_{out} N(k-1)} \right);$$

- с вероятностью γ создается новый узел v и входящая в него связь из существующего узла w , который выбирается с вероятностью

$$(P_\gamma)_{w,v} = \frac{O_{k-1}(w) + \delta_{out}}{k-1 + \delta_{out} N(k-1)},$$

а также с вероятностью r будет принято решение равномерно среди всех удалить один узел. Здесь $I_k(w), O_k(w)$ - количество входящих и исходящих связей узла w , $N(k) = |V(k)|$ - количество узлов в графе на шаге эволюции k . Согласно предложенным схемам возможны случаи появления параллельных связей и петель [6, 7].

Пусть в дальнейшем будет рассматриваться передача одного сообщения из одного узла до заданного n количества узлов направленного

меняющегося графа. Сообщение может передаваться только в момент создания новой связи и передаваться только в направлении связи. Такой подход будет имитировать реальную передачу сообщений. Это возможно, только если связи созданы с помощью γ - и β -схем. Определим необходимое количество тиков часов

$$K(n, \delta) = \inf \{k \geq 0 : P(S(k) < n) \leq \delta\}, \quad (1)$$

при котором сообщение не было получено n узлами с вероятностью $1 - \delta \in (0, 1)$ [8]. Такое определение необходимо, чтобы учесть, что количество и состав узлов графе будет меняться в процессе эволюции. Здесь обозначим $S(k)$ как группу узлов, которая имеет сообщение в момент тика часов k , $S(0) = 1$.

Для дальнейшего анализа распространения сообщений проанализируем число узлов $S(k+1)$, получивших сообщение на шаге эволюции $k+1$. Для этого зафиксируем состояние графа $G(k)$ на прошлом шаге эволюции, и получаем

$$E[|S(k+1)| | G(k)] = |S(k)| + \gamma \sum_{w \in S(k)} \frac{O_k(w) + \delta_{out}}{e(k) + \delta_{out}N(k)} + \\ + \beta \sum_{w \in S(k)} \sum_{v \notin S(k)} \frac{O_k(w) + \delta_{out}}{e(k) + \delta_{out}N(k)} \frac{I_k(v) + \delta_{in}}{e(k) + \delta_{in}N(k)} - r \frac{\alpha + \gamma}{N(k)} |S(k)|.$$

Здесь мы учли, что сообщения могут передаваться только по направлению новой созданной связи по γ -схеме и с помощью β -схемы, если связь была создана между узлом с сообщением к узлу без него. Также выражение учитывает, что один из узлов с сообщением может быть удален. Взяв матожидание от обеих частей выражения, можно получить

$$E[|S(k+1)|] = E[|S(k)|] + (\gamma + \beta) E[|S(k)|] \frac{E[O_k] + \delta_{out}}{E[e(k)] + \delta_{out}E[N(k)]} - \\ - \beta (E[|S(k)|])^2 \frac{E[O_k] + \delta_{out}}{E[e(k)] + \delta_{out}E[N(k)]} \frac{E[I_k] + \delta_{in}}{E[e(k)] + \delta_{in}E[N(k)]} - r \frac{\alpha + \gamma}{N(k)} E[|S(k)|].$$

Далее, считая $E[I_w] = E[O_w] = \frac{E[e(k)]}{E[N(k)]}$ и сделав замену

$E[N(k)] = k(1 - \beta)(1 - r) + N_0$, перепишем выражение для доли узлов графа

$p(k) = \frac{E[S(k)]}{E[N(k)]}$, получивших сообщение:

$$((k+1)(1 - \beta)(1 - r) + N_0)p(k+1) = (k(1 - \beta)(1 - r) + N_0)p(k) + (\gamma + \beta)p(k) - \beta p^2(k) - r(\alpha + \beta)p(k)$$

или

$$p(k+1) = \frac{k(1 - \beta)(1 - r) + N_0 + (\gamma + \beta) - r(\alpha + \beta)}{(k+1)(1 - \beta)(1 - r) + N_0} p(k) - \frac{\beta}{(k+1)(1 - \beta)(1 - r) + N_0} p^2(k)$$

что дает ограничение вида

$$p(k+1) \leq \frac{k(1-\beta)(1-r) + N_0 + (\gamma + \beta) - r(\alpha + \beta)}{(k+1)(1-\beta)(1-r) + N_0} p(k). \quad (2)$$

Далее рассмотрим два возможных случая.

Неограниченный рост графа при $r < 1$. Преобразуем выражение (2):

$$p(k+1) \leq \frac{k + \frac{N_0 + (\gamma + \beta) - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)}}{k+1 + \frac{N_0}{(1-\beta)(1-r)}} p(k) \leq \frac{(k + \frac{N_0 + (\gamma + \beta) - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)})!}{(k+1 + \frac{N_0}{(1-\beta)(1-r)})!} p(0),$$

где $p(0)$ – доля узлов изначально, обладающих сообщением. Далее воспользуемся фактом, что отношение факториалов при $k \rightarrow \infty$ отношение факториалов $\frac{(k+a)!}{(k+b)!} \sim C^* k^{-b+a}$, где C – некоторая константа. Из этого мы

можем получить $p(k+1) \leq C^* p(0) k^{\frac{\gamma + \beta - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)}}$, что в можно переписать как $E[S(k+1)] \leq C k^{\frac{\gamma + \beta - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)}}$ при условии $\frac{\gamma + \beta - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)} < 1$.

Далее доказательство опирается на доказательство Леммы 1 из [5].

Пусть $Z(k) = |S(k)| - C k^{\frac{\gamma + \beta - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)}}$. Определим такой момент $L_1 = \inf\{k : |S(k)| > n\}$ и $L_1 \wedge k = \min(L_1, k)$. Таким образом неравенство, полученное для условного матожидания, определяет $Z(L_1 \wedge k)$ как субмартиггал. Чтобы проверить это, докажем основное свойство субмартиггала, что $E[Z(L_1 \wedge k+1) | S(k)] \geq Z(L_1 \wedge k)$. Докажем для случая, когда $|S(k)| \leq n$:

$$\begin{aligned} & E[Z(L_1 \wedge (k+1)) | S(L_1 \wedge k)] = E[|S(L_1 \wedge (k+1))| | S(L_1 \wedge k)] - \\ & - E[(L_1 \wedge (k+1))^{\frac{\gamma + \beta - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)}} | S(L_1 \wedge k)] \geq \\ & \geq \frac{k + \frac{N_0 + (\gamma + \beta) - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)}}{k+1 + \frac{N_0}{(1-\beta)(1-r)}} E[|S(L_1 \wedge k)| | S(L_1 \wedge k)] - \\ & - E[\frac{(L_1 \wedge k+1)^{\frac{\gamma + \beta - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)}}}{(L_1 \wedge k)^{\frac{\gamma + \beta - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)}}} | S(L_1 \wedge k)] E[(L_1 \wedge k)^{\frac{\gamma + \beta - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)}} | S(L_1 \wedge k)] = \\ & = (1 + \frac{N_0 + (\gamma + \beta) - r(\alpha + \beta)}{k(1-\beta)(1-r)}) (1 - \frac{N_0}{k(1-\beta)(1-r)}) E[|S(L_1 \wedge k)| | S(L_1 \wedge k)] - \\ & - (1 \wedge (1 + \frac{1}{k})^{\frac{\gamma + \beta - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)}})^{\frac{\gamma + \beta - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)}} E[(L_1 \wedge k)^{\frac{\gamma + \beta - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)}} | S(L_1 \wedge k)] \geq \\ & \geq E[|S(L_1 \wedge k)| | S(L_1 \wedge k)] - E[\Phi(G)(L_1 \wedge k) + 1 | S(L_1 \wedge k)] = Z(L_1 \wedge k). \end{aligned}$$

Поскольку $Z(L_1 \wedge k) \geq Z(L_1 \wedge k)$, для любого $k > 0$ справедливо

$E[Z(L_1 \wedge 0)] \leq E[Z(L_1 \wedge k)]$ и $E[(L_1 \wedge k)^{\frac{\gamma + \beta - r(\alpha + \beta)}{(1-\beta)(1-r)}} (L_1 \wedge k)] \leq E[|S(L_1 \wedge k)|]$, при условии

$Z(L_1 \wedge 0) = Z(0) = 0$. Используя это факт, получаем $E[(L_1 \wedge k)^{\frac{\gamma+\beta-r(\alpha+\beta)}{(1-\beta)(1-r)}}] \leq n$ или $E[L_1^{\frac{\gamma+\beta-r(\alpha+\beta)}{(1-\beta)(1-r)}}] \leq n$ при $k \rightarrow \infty$. Используя неравенство Маркова, выпишем неравенства $P(L_1 > k_1) = P(L_1^{\frac{\gamma+\beta-r(\alpha+\beta)}{(1-\beta)(1-r)} > k_1^{\frac{\gamma+\beta-r(\alpha+\beta)}{(1-\beta)(1-r)}}) < \frac{n}{k_1^{\frac{\gamma+\beta-r(\alpha+\beta)}{(1-\beta)(1-r)}} < \delta$ при условии $\frac{\gamma+\beta-r(\alpha+\beta)}{(1-\beta)(1-r)} > 0$. Согласно определению (1), предполагается

$P(L_1 > k_1) = P(S(k) < n)$. При $k_1 = \left(\frac{n}{\delta}\right)^{\frac{\gamma+\beta-r(\alpha+\beta)}{(1-\beta)(1-r)}}$, будет выполнено условие $P(|S(k)| \neq n) < \delta$, а значит ограничение для $K(n, \delta)$ представимо в виде

$$K(n, \delta) = O\left(\left(\frac{n}{\delta}\right)^{\frac{\gamma+\beta-r(\alpha+\beta)}{(1-\beta)(1-r)}}\right) \text{ при условии } 1 > \frac{\gamma+\beta-r(\alpha+\beta)}{(1-\beta)(1-r)} > 0. \quad (3)$$

Эволюция графа фиксированного размера при $r=1$. Преобразуем выражение (2):

$$p(k+1) \leq \left(1 + \frac{\gamma-\alpha}{N_0}\right) p(k),$$

которое выполнено при $\gamma-\alpha > 0$. Если условие не выполнено, то можно говорить, что система будет постепенно терять узлы с сообщениями и за конечное число шагов граф “забудет” о сообщениях.

Далее доказательство снова опирается на доказательство Леммы 1 из [5]. Пусть $Z(k) = |S(k)| - \left(1 + \frac{\gamma-\alpha}{N_0}\right)^k$. Определим такой момент $L_2 = \inf\{k : |S(k)| > n\}$ и $L_1 \wedge k = \min(L_1, k)$. Полностью следуя доказательству из [5] и случаю $r < 1$, можно получить

$$E[e^{\frac{\gamma-\alpha}{2N_0} L_2}] \leq n.$$

Используя неравенство Маркова, выпишем неравенства $P(L_2 > k_2) = P(e^{\frac{\gamma-\alpha}{2N_0} L_2} > e^{\frac{\gamma-\alpha}{2N_0} k_2}) < \frac{n}{e^{\frac{\gamma-\alpha}{2N_0} k_2}} < \delta$. Согласно определению (1), предполагается $P(L_2 > k_2) = P(S(k) < n)$, а значит ограничение для $K(n, \delta)$ представимо в виде

$$K(n, \delta) = O\left(\frac{\log(n) + \log(\delta^{-1})}{\gamma-\alpha}\right) \text{ при условии } \gamma-\alpha > 0. \quad (4)$$

Заключение. В работе представлен способ распространения сообщений в направленном графе, в котором узлы и связи меняются методом предпочтительного присоединения с равномерным удалением узлов с заданной частотой. Введя, количество шагов, необходимого для

доставки сообщения на заданное число узлов, исследуется два случая эволюции: неограниченный рост графа и эволюция графа фиксированного размера. Для каждого из них были получены свои ограничения при заданных параметрах модели. В дальнейшей работе представляет интерес исследование неограниченного роста, при отсутствии предложенных ограничений на параметры модели эволюции, а также уточнение полученных ограничений.

Библиографический список

1. Censor-Hillel, K. Partial Information Spreading with Application to Distributed Maximum Coverage / K. Censor-Hillel, H. Shachnai // In Proceedings of the 29th ACM symposium on Principles of distributed computing (PODC '10). – ACM, New York, USA. – 2010. – P. 161–170.
2. Ghoshal, G. Uncovering the role of elementary processes in network evolution / G. Ghoshal, L. Chi, A.-L. Barabasi // Scientific Reports. – 2013. – Vol. 3. – P. 2920.
3. Lind, P. Spreading gossip in social networks / P. Lind, L. Silva, J. Andrade, H. Herrmann // Physical review E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics. – 2007. – Vol. 76. – P. 036117.
4. Markovich, N.M. Leader Nodes in Communities for Information Spreading / N.M. Markovich, M.S. Ryzhov // In: Vishnevskiy, V.M., Samouylov, K.E., Kozyrev, D.V. (eds) Distributed Computer and Communication Networks. Lecture Notes in Computer Science. – Springer, Cham. – 2020. – Vol. 12563.
5. Mosk-Aoyama, D. Computing separable functions via gossip / D. Mosk-Aoyama, D. Shah // In Proceedings of the 25th ACM symposium on Principles of distributed computing (PODC '06). ACM, New York, USA, 2006. – P. 113–122.
6. Wan, P. Fitting the linear preferential attachment model / P. Wan, T. Wang, R. A. Davis, S.I. Resnick // Electronic Journal of Statistics. – 2017. – Vol. 11, No. 2. – P. 3738–3780.
7. Wan, P. Are extreme value estimation methods useful for network data? / P. Wan, T. Wang, R. A. Davis, S.I. Resnick // Extremes. – 2020. – Vol. 23. – P. 171–195.
8. Рыжов, М.С. Модификация алгоритма SPREAD для распространения сообщения в случайном графе / Труды 17-й Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2021, Москва). – Москва-Звенигород: ИПУ РАН. – 2021. – С. 267–276.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

В.А. Сергеев

В статье предлагается к рассмотрению пошаговый подход к задаче идентификации механизмов комплексного оценивания. В основе данного подхода – декомпозиция структуры механизма комплексного оценивания по матрицам дерева сверток. Таким образом, в каждом из узлов структуры МКО составляется оптимизационная задача меньшей сложности чем оптимизационная задача для идентификации МКО целиком.

Ключевые слова: механизмы комплексного оценивания, ранжирование, оценка, декомпозиция.

Введение. Механизмы комплексного оценивания были введены в качестве многомерных систем оценки и ранжирования для управления и контроля в организационных и производственных системах в начале 80-х годов прошлого века (например, система АККОРД [1]) и используются по сей день (см., например, [2–6]). Обычно МКО применяется для порядкового ранжирования (или классификации) с заранее определенным числом классов конечного набора многокритериальных альтернатив (анализ дискретных данных [7]). Основные компоненты МКО – бинарное дерево и матрицы свертки, которые позволяют получать комплексное оценивание (КО) основанное на значениях нескольких входных индикаторов.

В последнее время начал появляться интерес к разработке обучающих процедур для МКО, которые довольно обычны для алгоритмов идентификации задач в области искусственного интеллекта. Недавно было предложено несколько подходов, позволяющих идентифицировать матрицы свертки по конкретному двоичному дереву [8–9]. В данной работе предлагается подход к идентификации, являющийся развитием работы над методом изложенным в [8]. Новый подход призван решить проблемы возникающие со сложностью решения оптимизационной задачи в ходе идентификации, для этого предлагается использовать метод декомпозиции дискретной функции.

Многие исследователи проявляли интерес к возможности декомпозиции функции, например: рассмотрение разложимости непрерывных функций (Колмогоров [11], Арнольд [12]), исследование неповторных булевых функций (Кузнецов [13]), исследование сложности представления булевых функций (Яблонский [14]), построение

декомпозиции алгебраических функций (Выхованец [15]), использование декомпозиции для построения критериально-целевой структуры (Глотов и Павельев [16]).

Основные понятия и определения. Пусть задан конечный набор индикаторов $L \subset \mathbb{N}$, $|L| = l$, на основе их значений должна быть произведена порядковая оценка некоторого объекта или ранжирование нескольких объектов. Для задачи идентификации МКО будем считать, что для каждого индикатора $i \in L$ задан конечный набор $K_i \subset \mathbb{N}$ его возможных значений $k_i \in K_i$, и вектор $k = (k_1, \dots, k_l)^T$ описывает любое возможное состояние оцениваемых объектов. Также есть конечный набор $KL \subset \mathbb{N}$ возможных интегральных значений (рангов или классов) $kL \in KL$ для любого k .

Чтобы не слишком загромождать текст формальными определениями вынужден рекомендовать читателю обратиться к работе [8]. Подробное определение МКО, унитарного представления и системы кодирования структур МКО изложено там.

В рамках данной работы акцент сделан на работу именно с дискретными шкалами как индикаторов (показателей), так и значений, получаемых в узлах дерева свертки [4]. Функция f , заданная на множестве K и принимающая значения на множестве KL , есть отображение K в KL такое, что каждый элемент x области определения K связан с не более чем с одним элементом области значений KL . Функция является дискретной, если ее область определения и область значений конечные множества.

Применение декомпозиции дискретной функции. В работе [8] был предложен подход к идентификации МКО с использованием механизма обучения на дискретных данных, в центре которого находится механизм составления оптимизационного функционала на основе входных данных и предложенной структуры полного бинарного дерева. Такой подход к задаче идентификации сопряжен с трудностями в решении оптимизационной задачи, в случае большой размерности входных данных. Степень оптимизационного полинома растет линейно в зависимости от количества входных параметров, а число общих ограничений оптимизационной задачи растет экспоненциально. В табл. 1 представлена динамика роста количества общих ограничений оптимизационной задачи, на основе некоторых дискретных наборов данных, для которых решалась задача идентификации.

Таблица 1

Динамика роста количества общих ограничений

Набор данных и количество параметров входных данных	Количество общих ограничений оптимизационной задачи
«Задача о футбольном клубе Зенит»: 4	32
«Оценка дизайнерских проектов»: 5	837
«Аттитюды»: 10	3,735,552

В качестве альтернативы было решено воспользоваться возможностью решения задачи идентификации по шагам, с помощью разделительной декомпозиции функции $f(X) = \Sigma(X_1, a(X_2))$, где Σ, a – некоторые функции, а $X_1 \cap X_2 = \emptyset$ – подмножества получающиеся в результате разделения X , см. [15]. Возможность разложения любой непрерывной функции n переменных в суперпозицию непрерывных функций меньшего числа переменных, исследовалась Колмогоровым и Арнольдом, в частности для двух, доказана в работах [12, 13]. Глотовым и Павельевым в [16] доказывается теорема о представимости дискретной функции n переменных в бинарном (разделительном) виде. Для случая МКО, т.е. с использованием полных бинарных деревьев легко показать, что без фиксирования значений $k_i \in K_i$ декомпозиция заданной функции возможна в любой структуре полного бинарного дерева, т.к. в силу конечного k_L шкала значений декомпозиции φ_{i+1} тоже конечна. Таким образом, имеет место последовательный подход к составлению и решению задач идентификации для декомпозиции в каждом из узлов рассматриваемого дерева из $\Gamma_2(L)$.

Для некоторого подмножества индикаторов $\tilde{L} \subseteq L$ обозначим $\lambda = (k_{(\tilde{L})}, k_{(L \setminus \tilde{L})})$ – разбиение кортежа индикаторов k для некоторого обучающего примера $q = (k, k_L)$ на два кортежа. В каждом из рассматриваемых узлов дерева будем называть компоненты φ_{i+1} в соответствии с разбиением. Например, для разбиения $\lambda = (k_{(0,1)}, k_{(2,3)})$ названия компонент двух подфункций будут записываться как: $\varphi_{i+1} - k_0 k_1$ и $\varphi_{i+1} - k_2 k_3$. В случае если составляется разбиение, состоящее из отдельного листа и группы: $\lambda = (k_{(0)}, k_{(2,3)})$, кодируем только $\varphi_{i+1} - k_2 k_3$, где $i \in \{1, \dots, l-1\}$ – шаг декомпозиции.

Обозначим $P(\varphi_{i+1}, q)$ – функцию, которая находится в левой части уравнения с правой частью, равной 1. Вследствие унитарного подхода есть только одна такая функция для любого q .

Утверждение 1. Для любых $L \subset \mathbb{N}$, $K \subset \mathbb{N}$, и любого возможного q в единой шкале: $P(\varphi_{i+1}, q)$ – однородный полиномом степени меньше или равный трем, который может быть представлен как сумма k^{φ_num} уникальных компонент:

$$P(\varphi_{i+1}, q) = \sum_{j=1}^{k^{\varphi_num}} p_j, \quad \forall j \in \{1, \dots, k^{\varphi_num}\},$$

$$p_j = m_j \prod_{d=1}^{\varphi_num} \varphi_d, \quad \forall d \in \{1, \dots, \varphi_num\},$$

при подсоединении к матрице ветви и листа $\varphi_num=1$, при подсоединении к матрице пары ветвей $\varphi_num=2$, m_j – одна компонента кортежа в некоторой ячейке унитарно закодированной матрицы \tilde{M}_i ;

$$P(\varphi_{i+1}, q) \in \{0,1\};$$

$$\varphi_i \text{ реализует } q \Leftrightarrow P(\varphi_{i+1}, q) = 1.$$

Считаем, что для любых $L \subset \mathbb{N}$, $K \subset \mathbb{N}$ и любого возможного $Q_i \subset K^{l+1}$ с единой шкалой, φ_i реализует Q_i когда $\sum_{q \in Q_i} P(\varphi_{i+1}, q) = |Q_i|$.

Таким образом, если удастся найти решение для матрицы верхнего уровня, можно продолжить декомпозицию на следующий узел структуры, в качестве функции теперь используя найденные значения φ_{i+1} .

Пример 1. Рассмотрим таблицу данных для задачи о предсказании выступления футбольного клуба «Зенит» из [17].

Таблица 2

Исходные данные «Задача о футбольном клубе Зенит»

q	\tilde{k}_0	\tilde{k}_1	\tilde{k}_2	\tilde{k}_3	\tilde{k}_L
1	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	1
3	1	1	0	0	0
4	0	0	1	0	1
5	1	1	1	0	1
6	0	1	0	1	1
7	1	0	1	1	0
8	1	1	1	1	0

Рассмотрим в первую очередь реализуемость функции $f = \varphi_1(\tilde{k}_0, \varphi_2(\tilde{k}_1, \tilde{k}_2, \tilde{k}_3))$, и в случае если φ_1 доступна в заданной шкале k_L , то перейдем к поиску реализации φ_2 . Положим разбиение первого уровня: $\lambda_1 = (k_{(0)}, k_{(1,2,3)})$. Составим уравнения для первого примера первой ступени:

$$\begin{pmatrix} \varphi_{2_000}^0 \\ \varphi_{2_000}^1 \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} a_{00}^0 \\ a_{00}^1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} a_{01}^0 \\ a_{01}^1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} a_{10}^0 \\ a_{10}^1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} a_{11}^0 \\ a_{11}^1 \end{pmatrix} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

с унитарными условиями

$$\forall \{i, j\} \in \{0,1\}^2 \quad a_{ij}^0 + a_{ij}^1 = 1 \quad a_{ij}^t \in \{0,1\},$$

$$\varphi_{2_000}^0 + \varphi_{2_000}^1 = 1, \quad \varphi_{2_000}^t \in \{0,1\},$$

$$\forall t \in \{0,1\}, \quad \varphi_{2_000}^0 a_{00}^0 + \varphi_{2_000}^1 a_{10}^0 = 1, \quad \varphi_{2_000}^0 a_{00}^1 + \varphi_{2_000}^1 a_{10}^1 = 0.$$

Далее, по схеме, описанной в примере 1, получаем набор уравнений для всех примеров:

$$\begin{aligned} \varphi_{2_000}^0 a_{00}^0 + \varphi_{2_000}^1 a_{10}^0 = 1; & \quad \varphi_{2_100}^0 a_{00}^1 + \varphi_{2_100}^1 a_{10}^1 = 1; \quad \varphi_{2_100}^0 a_{01}^0 + \varphi_{2_100}^1 a_{11}^0 = 1; \\ \varphi_{2_010}^0 a_{00}^1 + \varphi_{2_010}^1 a_{10}^1 = 1; & \quad \varphi_{2_110}^0 a_{10}^1 + \varphi_{2_110}^1 a_{11}^1 = 1; \quad \varphi_{2_101}^0 a_{00}^1 + \varphi_{2_101}^1 a_{10}^1 = 1; \\ \varphi_{2_011}^0 a_{01}^0 + \varphi_{2_011}^1 a_{11}^0 = 1; & \quad \varphi_{2_111}^0 a_{01}^0 + \varphi_{2_111}^1 a_{11}^0 = 1, \end{aligned}$$

из которых составляем оптимизационную задачу:

$$\begin{aligned} \varphi_{2_000}^0 a_{00}^0 + \varphi_{2_000}^1 a_{10}^0 + \varphi_{2_100}^0 a_{00}^1 + \varphi_{2_100}^1 a_{10}^1 + \varphi_{2_100}^0 a_{01}^0 + \varphi_{2_100}^1 a_{11}^0 + \varphi_{2_010}^0 a_{00}^1 + \varphi_{2_010}^1 a_{10}^1 + \varphi_{2_110}^0 a_{10}^1 + \\ + \varphi_{2_110}^1 a_{11}^1 + \varphi_{2_101}^0 a_{00}^1 + \varphi_{2_101}^1 a_{10}^1 + \varphi_{2_011}^0 a_{01}^0 + \varphi_{2_011}^1 a_{11}^0 + \varphi_{2_111}^0 a_{01}^0 + \varphi_{2_111}^1 a_{11}^0 \rightarrow \max. \end{aligned}$$

Плюс ограничения, выписанные на основе анализа конфликтов между уравнениями, составленными для разных примеров:

$$\varphi_{3_10} \varphi_{3_00} = 0; \quad \varphi_{3_01} \varphi_{3_00} = 0; \quad \varphi_{3_00} = \varphi_{3_11}.$$

Полученное решение:

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\varphi}_3 = \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right).$$

Очевидно, что φ_3 в дальнейшей декомпозиции не нуждается, из него получаем

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \end{bmatrix}.$$

Сложность задачи. Так как в каждом из рассматриваемых узлов $G \in \Gamma_2(L)$ степень полинома не превышает трех, то сложность составляемых оптимизационных задач невелика и удается их быстро решать средствами оптимизатора. Например, Gurobi 9.5.0 решает оптимизационную задачу (8 квадратичных ограничений и 16 общих ограничений) первой степени второго примера за 30 мсек на AMD Ryzen 7

4800H, 16гб оперативной памяти. Как видно из формулы $P(\varphi_{i+1}, q) = \sum_{j=1}^{K^{\varphi_num}} p_j$, число мономов оптимизационного полинома, а значит и сложность задачи оптимизации в предлагаемом подходе не зависит от числа входных параметров, это обеспечивает возможность братья за наборы дискретных данных с большим числом параметров.

Заключение. Рассмотрен подход позволяющий существенно снизить вычислительную сложность составляемых оптимизационных задач путем декомпозиции исходной задачи на более простые. Основа уменьшения

сложности оптимизационной задачи избавление от зависимости от количества входных параметров, для каждого отдельного узла МКО. Второй плюс предлагаемого подхода состоит в том, что в случае отсутствия решений на некотором шаге декомпозиции φ_i , в заданной шкале K_L , нет необходимости рассматривать продолжение декомпозиции, в виду отсутствия решения задачи в заданной шкале. Для дальнейшего исследования оставлен вопрос сортировки наиболее перспективных решений из общего пула решений на данной ступени.

Библиографический список

1. Гореликов, Н.И. Проблемы совершенствования отраслевого механизма управления разработкой и производством новой продукции / Н.И. Гореликов // Автоматика и телемеханика. – 1984. – №5. – С. 63–70.

2. Бурков, В.Н. Механизмы управления эколого-экономическими системами: монография / В.Н. Бурков, Д.А. Новиков, А.В. Щепкин; Под ред. академика С.Н. Васильева. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2008. – 244 с.

3. Korgin, N.A. Concordant Approach for R&D Projects' Evaluation and Ranking For Formation of Programs for the Creation of Scientific and Technological Potential / N.A. Korgin, S.M. Rozhdestvenskaya // Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies: AICT2017, Moscow. – IEEE, 2017. – Vol. 2. – P. 358–362.

4. Shchepkin, A. Application of Integrated Mechanism in Financing Project Works / A. Shchepkin // Proceedings of the 13th International Conference Management of large-scale system development: MLSD, Moscow. – IEEE, 2020. – 4 p.

5. Zheglova, Y. Methodology for the integrated assessment of design solutions for foundation pit fences based on the theory of active systems / Y. Zheglova, B. Titarenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Mol. 869. – P. 052012.

6. Burkov, V. Models and Management Structure for the Development and Implementation of Innovative Technologies in Railway Transportation. I. Mechanisms of Priority Projects Selection and Resource Allocation / V.N. Burkov, A.K. Enaleev, V.I. Strogonov, D.N. Fedyanin // Automation and Remote Control. – 2020. – Vol. 81. – P. 1316–1329.

7. Mariel, P. Environmental valuation with discrete choice experiments: Guidance on design, implementation and data analysis / P. Mariel et al. – Berlin: Springer Nature, 2021. – 136 p.

8. Burkov, V. Identification of Integrated Rating Mechanisms as Optimization Problem / V. Burkov, N. Korgin, V. Sergeev // Proceedings of the 13th International Conference "Management of Large-Scale System Development": MLSD, Moscow. – IEEE, 2020. – 5 p.

9. Alekseev, A. Identification of Integrated Rating Mechanisms Based on Training Set / A. Alekseev // Proceedings of the 2nd International Conference on Control

Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency: SUMMA. – IEEE, 2020. – P. 398–403.

10. Yu, L. Missing Data Preprocessing in Credit Classification: One-Hot Encoding or Imputation? / L. Yu et al. // Emerging Markets Finance and Trade. – 2020. – Vol 58. – P. 472–482.

11. Колмогоров, А.Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями непрерывных функций меньшего числа переменных / А.Н. Колмогоров // ДАН СССР. – 1956. – Т. 108. – № 2.

12. Арнольд, В.И. О функции трех переменных / В.И. Арнольд // ДАН СССР. – 1957. – Т. 114 (4). – С. 679–681.

13. Кузнецов, А.В. О неповторных контактных схемах и неповторных суперпозициях функций алгебры логики / А.В. Кузнецов // Тр. Матем. ин-та им. В.А. Стеклова АН СССР. – 1958. – Т. 51. – С. 186–225.

14. Яблонский, С.В. Об алгоритмических трудностях синтеза минимальных контактных схем / С.В. Яблонский // Проблемы кибернетики. М.: Физматгиз. – 1959. – №2. – С. 75–121.

15. Выхованец, В.С. Алгебраическая декомпозиция дискретных функций / В.С. Выхованец // Автоматика и телемеханика. – 2006. – №3. – С. 20–56.

16. Глотов, В.А. Векторная стратификация: монография / В.А. Глотов, В.В. Павельев. – М.: Наука, 1984. – 132 с.

17. Николенко, С.И. Самообучающиеся системы: монография / С.И. Николенко, А.Л. Тулупьев. – М.: МЦНМО, 2009. – 287 с.

ПОВЕДЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ТРЕХМЕРНОЙ СИСТЕМЫ ЭПИДЕМИИ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧЕК ПОКОЯ

О.С. Ткачева, Ю.М. Рассадин

Рассматривается трехмерная модель эпидемии. В рамках качественного анализа трехмерных моделей эпидемии найдены условия, при которых она имеет одну или две точки покоя в положительном октанте. С учетом найденных условий подобраны параметры модели, проведена классификация точек покоя. Справедливость проведенного анализа подтверждается фазовыми портретами системы в окрестности точек покоя.

Ключевые слова: точки покоя, модель эпидемии, фазовый портрет, положительный октант.

Введение. Представляется интерес анализ качественных свойств динамических объектов, описываемых системами обыкновенных дифференциальных уравнений невысокой размерности, которые используются как модели различных процессов в научных исследованиях в биологии, медицине. Важнейшим пунктом в исследовании поведения динамических систем является количество положений равновесий [1–3].

В [1] представлена модель растений, подверженных заболеваниям, связанным с насекомыми. Исследованы основные результаты по ограниченности решений, достижимость точек равновесий, равномерной устойчивости, а также вопросы локальной и глобальной устойчивости стандартными методами теории устойчивости. В [2] построена и проанализирована нелинейная математическая модель, используемая для воздействия вакцинации на борьбу с инфекционным заболеванием, японским энцефалитом со стандартным уровнем заболеваемости комаров, свиней и людей. С помощью теории устойчивости дифференциальных уравнений и численного моделирования исследуются поведение системы, локальная и глобальная устойчивость системы для всех состояний равновесия при определенных условиях. Найдено условие на параметры системы при выполнении которого, болезнь умирает в отсутствие инфицированной популяции. В [3] моделируется болезнь с зависимой от плотности передач в колебательной системе хищник-жертва. Показано, что условие сохранения болезни в циклах хищник – жертв основано на средней по времени плотности у носителя, а не на равновесной плотности. В работах [1,2,3] совпадает общий вид моделей, но вариация параметров приводит к существенно разному поведению. Таким образом, возникает задача разработки аналитического подхода к классификации

эпидемиологических моделей для своевременного предсказания ее поведения.

В статье рассматривается трехмерная модель эко-эпидемии [3,4]. В рамках качественного анализа для модели найдены условия, при которых она имеет одну или две точки покоя в положительном октанте.

Условия существования двух точек покоя. Рассмотрим следующую модель эпидемии, описываемую с учетом биологических ограничений на фазовые переменные и параметры:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= a_1 y_1 - a_1 y_1^2 - \frac{y_1(y_2 + y_3)}{a_2 + y_1} ; \\ \dot{y}_2 &= \frac{y_1(y_2 + y_3)}{a_2 + y_1} - a_3 y_2 - a_4 y_2 y_3 ; \\ \dot{y}_3 &= y_3(a_4 y_2 - a_3 - a_5). \end{aligned} \quad (1)$$

Система взята из работы [3]; здесь через $y_1(t)/y_2(t)/y_3(t)$ обозначается плотность популяций жертвы/восприимчивых хищников/зараженных хищников; $y_i > 0$; $i = 1; 2; 3$: В уравнениях (1) параметры $a_i = 1 \dots 5$; перемасштабированные параметры: a_1 – скорость прироста добычи на душу населения (при редкости); a_2 – плотность полунасыщения для функционального ответа II типа по Холлингу; a_3 – естественная подушевая смертность хищника; a_4 – коэффициент контагиозности болезни; a_5 – смертность хищника от болезней на душу населения.

В этом разделе попробуем получить условия на параметры a_i , $i = 1..5$, при которых система (1) имеет две внутренних точки покоя в правом октанте – это явление описывает случай сохранения/вымирания популяций хищников, в том числе курьезный случай, когда жертвы и восприимчивые хищники сохраняются, а инфицированные хищники вымирают. Приравняв к нулю все производные системы (1), получим вид (2):

$$\begin{aligned} a_1 y_1 - a_1 y_1^2 - \frac{y_1(y_2 + y_3)}{a_2 + y_1} &= 0 ; \\ \frac{y_1(y_2 + y_3)}{a_2 + y_1} - a_3 y_2 - a_4 y_2 y_3 &= 0 \\ y_3(a_4 y_2 - a_3 - a_5) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Пусть $y_1 = y_{1*}$ – одно из решений системы (2). Заметим, что $y_{2*} = \frac{a_3 + a_5}{a_4}$. Заметим, что y_{1*} находится из следующего уравнения, к которому преобразуется система (2):

$$y_{1*}^2 - \left(\frac{a_2}{\alpha} + 1\right) y_{1*} + \left[\frac{a_2}{\alpha} - \frac{a_5}{\alpha a_1 a_4}\right] = 0, \alpha = \frac{1}{a_3 + a_5} - 1. \quad (3)$$

Выпишем условие существования двух действительных корней уравнения (2) (положительность дискриминанта и теорема Виета):

$$D_0 = \left(\frac{a_2}{\alpha - 1}\right)^2 + 4 \frac{a_5}{a_1 a_4 \alpha} > 0, \quad (4)$$

$$a_2/\alpha + 1 > 0, \quad a_2/\alpha - \frac{a_5}{a_1 a_4 \alpha} > 0.$$

Рассмотрим условия положительности y_3 при $y_{1*} > 0$:

$$y_3 = -y_{1*}^2 + y_{1*} - \frac{(a_3 + a_5)}{a_4 a_1}.$$

Положительность y_3 зависит от диапазона значений y_1 :

$$y_{1*}(-y_{1*} + 1) - a_3 \frac{(a_3 + a_5)}{a_4 a_1} > 0 \quad (5)$$

Видно, что для выполнения условия (5) необходимо $y_{1*} < 1$. Таким образом имеем, что корни уравнения (3) должны лежать в промежутке от нуля до единицы. Это необходимое, но не достаточное условие. Заметим, что y_3 квадратично зависит от y_{1*} . Тогда имеем следующие ограничения на корни уравнения (5):

$$\begin{aligned} -2 < \frac{a_2}{\alpha} - 1 + \sqrt{\left(\frac{a_2}{\alpha} - 1\right)^2 + 4 \frac{a_5}{a_1 a_4 \alpha}} < 0; \\ -2 < \frac{a_2}{\alpha} - 1 - \sqrt{\left(\frac{a_2}{\alpha} - 1\right)^2 + 4 \frac{a_5}{a_1 a_4 \alpha}} < 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Рассмотрим случай $\alpha > 0$: то есть $a_3 + a_5 < 1$. При $\alpha > 0$ и $(\forall i) a_i > 0$ первое выражение из (3) всегда положительно. Рассмотрим условия ограниченности корней (6) с учетом $\alpha > 0$. При $\alpha > 0$ выполняется $\frac{a_2}{\alpha} > 0$, то есть условие $\frac{a_2}{\alpha} + \sqrt{D} < 0$ невыполнимо. Таким образом, при $\alpha > 0$ не существует двух точек покоя для системы (1) в правом октанте.

Рассмотрим второй случай: $\alpha < 0$. В этом случае необходимо более детальное исследование первого выражение из условия (4):

$$D_\alpha = \alpha^2 + \alpha \left(4 \frac{a_5}{a_1 a_4} - 2a_2 \right) + a_2^2 > 0$$

Это парабола, зависящая от α . Зафиксируем $a_1, a_2, a_4, a_5 > 0$, пусть меняется только $a_3 > 0$. Нас устраивает, когда уравнение $D_\alpha = 0$ не имеет корней в области $\alpha < 0$. Это возможно в двух случаях. Когда уравнение не имеет корней в принципе, и когда нет корней в области $\alpha < 0$. Рассмотрим первый случай:

$$D_1 = \frac{a_5}{a_1 a_4} \left(\frac{a_5}{a_1 a_4} - a_2 \right) < 0$$

Таким образом, имеем $\frac{a_5}{a_1 a_4} < a_2$. Это противоречит условию положительности корней (3): $\frac{a_2}{\alpha} - \frac{a_5}{a_1 a_4 \alpha} > 0$, следовательно: $a_2 < \frac{a_5}{a_1 a_4}$.

Рассмотрим второй случай. Корни существуют в области $\alpha > 0$ если выполнены следующие условия:

$$D_\alpha|_{\alpha=0} = a_2^2 > 0, D'_\alpha|_{\alpha=0} = 4 \frac{a_5}{a_1 a_4} - 2a_2 < 0, \frac{a_5}{a_1 a_4} > a_2.$$

Тогда

$$\frac{a_5}{a_1 a_4} < \frac{a_2}{2}, \frac{a_5}{a_1 a_4} > a_2.$$

Здесь наблюдается противоречие. Тогда остается следующий вариант, когда уравнение $D_\alpha = 0$ имеет корни в области $\alpha < 0$, рассматривается следующая область: $\alpha \in (\infty, \alpha_1] \cup [\alpha_2, 0)$, где $\alpha_{1,2} = -4 \frac{a_5}{a_1 a_4} + 2a_2 \pm \sqrt{D_1}$.

Таким образом,

$$D'_\alpha |_{\alpha=0} = 4 \frac{a_5}{a_1 a_4} - 2a_2 > 0, \frac{a_5}{a_1 a_4} > a_2.$$

Выбираем наиболее сильное условие, которое обеспечит существование α_1, α_2 в отрицательной области:

$$\frac{a_5}{a_1 a_4} > a_2.$$

Это не противоречит уже полученным условиям. Собираем все вместе:

$$\begin{aligned} a_2 &< \frac{a_5}{a_1 a_4}, \\ \alpha &\in \left(-\infty, -4 \frac{a_5}{a_1 a_4} + 2a_2 - \sqrt{\frac{a_5}{a_1 a_4} \left(\frac{a_5}{a_1 a_4} - a_2 \right)} \right) \cup \left(-4 \frac{a_5}{a_1 a_4} + 2a_2 + \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{\frac{a_5}{a_1 a_4} \left(\frac{a_5}{a_1 a_4} - a_2 \right)}, 0 \right) \\ &\quad \frac{a_2}{2} + \frac{\sqrt{\frac{a_5}{a_1 a_4} \left(\frac{a_5}{a_1 a_4} - a_2 \right)}}{4} < \frac{a_5}{a_1 a_4}; \\ &\quad -2 < \frac{a_2}{\alpha} - 1 + \sqrt{\left(\frac{a_2}{\alpha} - 1 \right)^2 + 4 \frac{a_5}{a_1 a_4 \alpha}} < 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом имеем условия на коэффициенты системы (1), при которых она будет иметь два внутренних положения равновесия в правом октанте.

Построение фазового портрета системы в окрестности точек покоя.

Подберем параметры a_i согласно условиям (6):

$$(a_1 = 11 \quad a_2 = 0.1 \quad a_3 = 0.5 \quad a_4 = 1.5 \quad a_5 = 3.4).$$

Тогда система (1) имеет шесть точек покоя:

$$E_1(0,0,0), E_2(1,0,0), E_3(0,2.6, -0.34), E_4(0.10,1.98,0), E_5(0.22, 2.6,0.153), \\ E_6(0.64,2.6,0.31).$$

Нас интересует положения равновесия E_5 и E_6 . Определим устойчивость данного положения равновесия. Собственные числа матрицы Якоби в точке $E_5:(2.83,0.29 + 0.81i, 0.29 - 0.81i)$. Таким образом, точка E_5 – это неустойчивый узел. Собственные числа матрицы Якоби в точке $E_6:(-3.5, -0.1 + 1.23i, -0.10 - 1.23i)$. Точка E_6 – это устойчивый узел.

Построим фазовые портреты системы в окрестности точек E_5 и E_6 (рис1) в среде для численного моделирования MATLAB. В качестве начальных условий используются точки окружности малого радиуса с

центром в точке покоя. Видно, что в окрестности точки E_5 траектории разбегаются, а в окрестности точки E_6 сходятся к точке покоя.

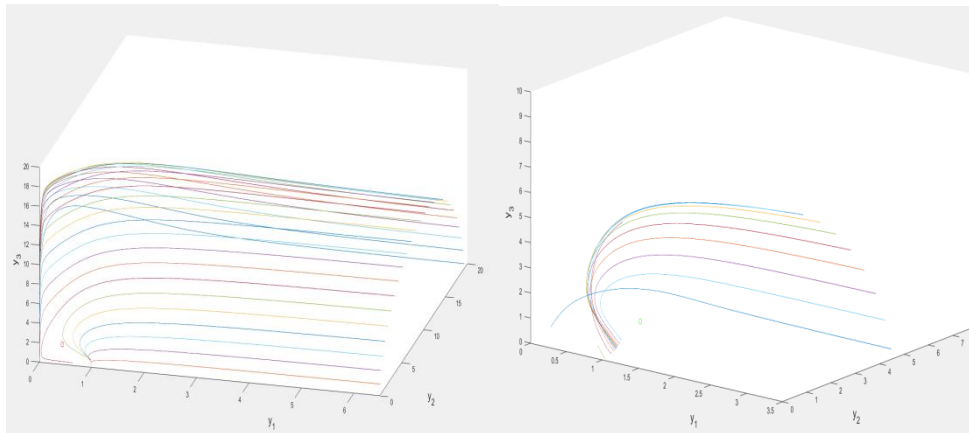


Рис. 1. Фазовые портреты системы (1) в окрестности точек E_5 и E_6

Заключение. В статье рассмотрена трехмерная модель эко-эпидемии. В рамках качественного анализа для модели были найдены условия, при которых она имеет одну или две точки покоя в положительном октанте. С учетом найденных условий были подобраны параметры модели, проведена классификация точек покоя. Было проведено численное моделирование и построен фазовый портрет системы в окрестности точек покоя. Стоит отметить, что полученные условия существования одной или двух точек покоя являются условиями бифуркации.

Библиографический список

1. Debasis, M. Effect of constant immigration in plant–pathogen–herbivore interactions / M. Debasis // Journal of Advances in Mathematics and Computer Science. – 2019. – Vol. 160. – P. 192–200.
2. Baniya, V. The influence of vaccination on the control of JE with a standard incidence rate of mosquitoes, pigs and humans / V. Baniya, R. Keval // Journal of Applied Mathematics and Computing. – 2020. – Vol. 64. P. 519–550.
3. Bate, A. Predator-prey oscillations can shift when diseases become endemic / A. Bate, F. Hilker // Journal of theoretical biology. – 2012. – Vol. 316. – 8 p.
4. Krishchenko, A.P. Stabilization in a 3D eco-epidemiological model: From the complete extinction of a predator population to their self-healing / A.P. Krishchenko, K.E. Starkov // Mathematical methods in the applied sciences. – 2020. – Vol. 18. – P. 10646–10658.

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИМПТОТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ВЛИЯНИЯ К ФИКСИРОВАННОМУ АГЕНТУ

Д.К. Холутов

Исследовано асимптотическое поведение протокола консенсуса при пропорциональном изменении влияния на фиксированного агента. Как следствие, получен метод сбалансирования орграфа с помощью положительной диагональной матрицы, на главной диагонали которой находятся компоненты вектора распределения. Решена обратная задача: найден класс орграфов, асимптотическое поведение которых идентично с поведением протоколов, один из которых был получен из другого путем пропорционального изменения влияния на фиксированного агента.

Ключевые слова: многоагентные системы, консенсус, собственный проектор, лапласовская матрица.

В последние десятилетия огромную актуальность приобрели исследования многоагентных систем, причем к подобным системам пришли ученые из разных сфер науки: математики, физики, робототехники, биологии и др. Многоагентная система – система, состоящая из взаимодействующих друг с другом интеллектуальных автономных агентов, которые обладают некоторой числовой характеристикой. Такие системы могут быть использованы для решения проблем, которые сложно или невозможно решить с помощью одного агента или некой монолитной системы.

Одной из подобных задач является задача достижения агентами консенсуса. Посредством влияния друг на друга агенты могут изменять характеристики своих соседей, на которых это влияние оказывается. Отсюда можно выделить три основных подзадачи:

- 1) условие, при котором агентами будет достигнут консенсус при любых начальных состояниях [1];
- 2) скорость достижения агентами консенсуса [2];
- 3) значение достигнутого консенсуса.

Стоит остановиться на последней подзадаче, для этого необходимо рассмотреть базовую дифференциальную модель консенсуса первого порядка. Пусть имеется орграф $G = (V, E)$, $V = \{1, \dots, n\}$ – множество вершин, соответствующих агентам, $E \subseteq V \times V$ – взвешенные дуги орграфа, соответствующие влиянию агентов. Если агент j влияет на агента i , то

существует дуга из j в i с весом a_{ij} . Тогда протокол консенсуса первого порядка имеет вид:

$$\dot{x}_i(t) = - \sum_{j=1}^n a_{ij} (x_i(t) - x_j(t)), \quad (1)$$

где $x(t) = (x_1(t), \dots, x_n(t))^T$ – вектор характеристик агентов.

Протокол (1) имеет следующий матричный вид:

$$\dot{x}(t) = -Lx(t), \quad (2)$$

где L – лапласовская матрица, $l_{ij} = -a_{ij}$, если $i \neq j$, $l_{ii} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$.

Также необходимо дать следующие определения:

Определение 1. Базовая бикомпонента орграфа – это такая сильно связная компонента орграфа, в которую не входят дуги из других частей орграфа. Если вершина принадлежит какой-либо базовой бикомпоненте, то такая вершина называется базовой. Если вершина не принадлежит ни одной базовой бикомпоненте, то такая вершина называется небазовой.

Далее будем считать, что вершины орграфа пронумерованы так, что $\{1, \dots, m\}$ – базовые вершины, сгруппированные по базовым бикомпонентам, $\{m + 1, \dots, n\}$ – небазовые вершины. Количество базовых бикомпонент будет обозначено в дальнейшем через v .

Тогда лапласовская матрица имеет следующий вид:

$$L = \begin{pmatrix} L_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & L_v & 0 \\ * & * & \dots & * & L_R \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Определение 2. Вес орграфа G – это произведение весов всех его дуг, т.е. $\varepsilon(G) = \prod a_{ij}$. Вес множества орграфов $\mathcal{G} = \{G_1, \dots, G_k\}$ – это сумма весов всех орграфов, т.е. $\varepsilon(\mathcal{G}) = \sum_{i=1}^k \varepsilon(G_i)$. Максимальный исходящий лес орграфа G – это такой исходящий лес, что орграф G не содержит исходящего леса с большим количеством дуг. Вес множества максимальных исходящих лесов обозначим через $\varepsilon(\mathcal{F})$. $\varepsilon(\mathcal{F}^{j \rightarrow i})$ – вес множества максимальных исходящих лесов, где вершина j является корнем одного из деревьев в лесе, а вершина i достижима из j .

Определение 3. Пусть $u = \text{ind}(A)$ – индекс матрицы, то есть такое минимальное число u , при котором $\text{rank}(A^u) = \text{rank}(A^{u+1})$, $R(A)$ – образ матрицы A , $N(A)$ – ядро матрицы A . Собственным проектором матрицы A является такая идемпотентная матрица A^\dagger , что $R(A^u) = N(A^\dagger)$, $R(A^\dagger) = N(A^u)$.

Стоит отметить, что в [3] доказано, что $\text{ind}(L) = 1$, где L – лапласовская матрица. Также в [4] показано, что собственный проектор лапласовской

матрицы есть нормированная матрица максимальных исходящих лесов: $L^+ = (l_{ij}^+) = \frac{1}{\varepsilon(\mathcal{F})} \left(\varepsilon(\mathcal{F}^{j \rightarrow i}) \right)_{ij}$.

Утверждение 1. [1] Если $x(t)$ – решение уравнения (2), то $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = L^+ x(0)$, где L^+ – собственный проектор лапласовской матрицы L .

Таким образом, асимптотическое поведение модели (2) определяется матрицей L . В данной статье будут рассмотрены две задачи.

1. Пусть влияния к фиксированному агенту меняются пропорционально, то есть имеется протокол (2), в котором лапласовская матрица определяется как $M = TL$, где $T = \text{diag}(t_1, \dots, t_n)$ – диагональная положительная матрица, L – исходная лапласовская матрица. Как изменится асимптотическое поведение модели консенсуса?

2. Пусть имеются две стохастические идемпотентные матрицы X, Y , которые связаны соотношением $Y = XD$, где D – положительная диагональная матрица. Какой класс орграфов соответствует собственным проекторам X и Y ?

Ответ на первую поставленную задачу сформулирован в следующей теореме:

Теорема 1. Пусть имеются лапласовские матрицы L и M , причем $M = TL$, где T – диагональная положительная матрица. Тогда существует положительная диагональная матрица D такая, что $M^+ = L^+ D$, причем $D = \text{diag}(d_1, \dots, d_n)$, где d_i при $i=1, \dots, m$ зависит от подматрицы L_s и t_i , если базовая вершина i принадлежит s -ой базовой бикомпоненте, а L_s – подматрица матрицы L в (3). Для $i > m$ в качестве d_i можно взять любое положительное число.

Определение 4. Сбалансированный орграф – орграф, для каждой вершины которой сумма весов входящих дуг равна сумме весов исходящих дуг.

Следствие. Пусть матрица $M = TL$, где L – лапласовская матрица, соответствующая сильно связному орграфу, а $T = \text{diag}(l_{11}^+, \dots, l_{nn}^+)$. Тогда

$$1) M^+ = \frac{1}{n} \mathbf{1}\mathbf{1}^T;$$

2) матрица $M = TL$ соответствует сбалансированному орграфу.

Стоит отметить, что вектор $(l_{11}^+, \dots, l_{nn}^+)^T$, при котором матрица $M = TL$ будет сбалансированной, является единственным вектором распределения.

Исходя из результатов, которые представлены в теореме 1, возникает обратная задача, которая была описана выше. Пусть имеются две стохастические идемпотентные матрицы X, Y , которые связаны как собственные проекторы из теоремы 1. Стохастическая идемпотентная матрица A имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} A_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_\nu & 0 \\ B_1 & B_2 & \dots & B_\nu & 0 \end{pmatrix},$$

где A_s – стохастическая подматрица, все строки которой равны $(a_1^s, \dots, a_{m_s}^s)$, матрица $B = (B_1 B_2 \dots B_\nu)$ – прямоугольная стохастическая матрица, причем s -ая строка подматрицы B_s равна $\gamma_{ks}(a_1^s, \dots, a_{m_s}^s)$, где $\gamma_{ks} \geq 0$ и $\sum_{s=1}^\nu \gamma_{ks} = 1$. Данная структура матрицы A идентична структуре собственного проектора.

Рассмотрим следующий алгоритм построения лапласовской матрицы по стохастической идемпотентной матрице A :

1) построим ν гамильтоновых циклов, где s -й цикл состоит из m_s вершин, причем в j -ю вершину s -го цикла входит дуга с весом $g_s \frac{1}{a_j^s}$, где g_s – произвольная ненулевая константа; (более подробно, см. [5]).

2) в вершину i , которая не принадлежит ни одному из циклов, проведем произвольное количество дуг из вершин $\{j_1, \dots, j_{m_s}\}$ s -ого цикла с условием, что сумма весов построенных дуг будет равна $\sum_{k=j_1}^{j_{m_s}} a_{ik} = \gamma_{is}$;

3) по построенному орграфу построим лапласовскую матрицу.

Теорема 2. Если по стохастическим идемпотентным матрицам X, Y , где $Y = XD$, D – диагональная положительная матрица, построим по вышеописанному алгоритму лапласовские матрицы L_X и L_Y соответственно, то собственными проекторами матриц L_X и L_Y будут матрицы X и Y соответственно.

Примечание. Для любого небазового агента i и s -го гамильтонова цикла с вершинами $\{j_1, \dots, j_{m_s}\}$ справедливо, что $\sum_{k=j_1}^{j_{m_s}} x_{ik} = \sum_{k=j_1}^{j_{m_s}} y_{ik} = \gamma_{is}$, где x_{ik}, y_{ik} – элементы матриц X, Y соответственно. Эти суммы – суммы весов входящих в i -ую вершину дуг из s -го цикла в обоих построенных орграфах. Таким образом, в построенных орграфах сумма входящих в любую небазовую вершину дуг из произвольного цикла одинакова.

Следствие. Пусть по матрицам X, Y построены графы G_X и G_Y , причем в обоих графах входящие в небазовые вершины дуги и их веса совпадают. Тогда $L_Y = TL_X$, где $T = \text{diag}(t_1, \dots, t_n)$, и

$$t_j = \begin{cases} g'_s \frac{x_j^s}{y_j^s}, j \in \{j_1, \dots, j_{m_s}\} \subseteq \{1, \dots, m\} \\ 1, j \in \{m+1, \dots, n\} \end{cases},$$

где g'_s – некая произвольная ненулевая константа, соответствующая s -ому циклу. Таким образом данный частный случай подходит под условия первой задачи, которая разбирается в данной статье.

Заключение. В результате проведенного исследования были решены описанные выше задачи. Исследовано асимптотическое поведение протокола (2) при пропорциональном изменении влияния на фиксированного агента. Подобная задача может возникнуть при исследовании систем социального взаимодействия, а также при следующей задаче.

Пусть имеется модифицированный протокол (2), в котором информация между агентами передается с некой уникальной для каждого агента задержкой:

$$\dot{x}_i(t) = - \sum_{j=1}^n l_{ij} x_j(t - \tau_j), i = 1, \dots, n. \quad (4)$$

Проведем замену $u_i(t) = x_i(\tau_i t)$, тогда из (3) получим:

$$\dot{u}_i(t) = -\tau_i \sum_{j=1}^n l_{ij} u_j(t - 1), i = 1, \dots, n,$$

что в матричном виде записывается как:

$$\dot{u}(t) = -TLu(t - 1), \quad (5)$$

где $T = \text{diag}(\tau_1, \dots, \tau_n)$. Протокол (4) сходится тогда и только тогда, когда сходится протокол (5).

Решена и обратная задача, а именно найден такой класс орграфов, зависимость асимптотических поведений которых идентично зависимости асимптотических поведений орграфов, лапласовские матрицы которых связаны соотношением $M = TL$. Подобный класс орграфов может быть полезен для графовой интерпретации элементов баз данных и последующей задачи их кластеризации [6].

Библиографический список

1. Агаев, Р.П. Об асимптотике в моделях консенсуса / Р.П. Агаев, П.Ю. Чеботарев // Управление большими системами. – 2013. – Вып. 3. – С. 55–77.
2. Olfati-Saber, R. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays / R. Olfati-Saber, R.M. Murray // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2004. – Vol. 49, No. 9. – P. 1520–1533.
3. Aгаев, R.P. Forest matrices around the Laplacian matrix / R.P. Aгаев, P.Y. Chebotarev // Linear algebra and its applications. – 2002. – Vol. 356, No. 1-3. – P. 253–274.
4. Агаев, Р.П. Основные леса орграфа и их применение / Р.П. Агаев, П.Ю. Чеботарев // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 3. – С. 108–133.
5. Агаев, Р.П. Представление дискретной процедуры согласования характеристик с помощью циклического орграфа / Р.П. Агаев, П.Ю. Чеботарев // Автоматика и телемеханика. – 2012. – № 1. – С. 178–183.

6. Fous, F. Random-walk computation of similarities between nodes of a graph with application to collaborative recommendation / F. Fous, A. Pirotte, J.-M. Renders, M. Saerens // IEEE Transactions on knowledge and data engineering. – 2007. – Vol. 19, No. 3. – P. 355–369.

СИНТЕЗ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ ПО КВАДРАТИЧНОМУ КРИТЕРИЮ

Д.В. Шатов, Б.Т. Поляк, М.В. Хлебников

Предлагается новый подход к синтезу параметров ПИД-регуляторов для линейных стационарных объектов управления при слежении за единичной ступенчатой уставкой. Процедура синтеза построена в форме решения оптимизационной задачи, где в качестве переменной выступает матрица параметров регулятора. Приводится численный пример, демонстрирующий эффективность подхода.

Ключевые слова: линейные следящие системы, ПИД-регулятор, синтез регуляторов, оптимизация, линейно-квадратичная задача.

ПИД-регуляторы являются наиболее востребованными и распространенными на практике законами управления. Это объясняется в первую очередь их простотой и эффективностью – требуется определить всего три коэффициента, чтобы обеспечить приемлемое качество управления для широкого круга технологических процессов. По этим причинам ПИД-регуляторы привлекают внимание большого числа исследователей, см., например, монографии [1, 2], посвященные анализу и синтезу ПИД-регуляторов.

Синтез параметров ПИД-регуляторов часто называют их настройкой (tuning), и существует большое число разнообразных методов и подходов к ее проведению; значительное их число собрано в сборнике «рецептов» для настройки [3]. Тем не менее, несмотря на наличие столь большого разнообразия подходов, в реальных производственных условиях очень часто ПИД-регуляторы настраиваются исходя из эвристических соображений и интуитивного понимания конкретного технологического процесса технологом.

Современные средства автоматизированного проектирования позволяют существенно облегчить процесс настройки ПИД-регуляторов; например, в среде MATLAB представлен инструмент PID Tuner, который позволяет по известной модели найти ПИД-регулятор, который настраивается по показателям быстродействия и робастности. Более широко использование MATLAB для синтеза ПИД-регуляторов описано в монографии [4].

В последние годы Б.Т. Поляком с соавторами [5] был предложен новый подход к решению линейно-квадратичных задач, который предполагает рассматривать синтез регуляторов как задачу матричной оптимизации, в которой переменной является матрица коэффициентов обратной связи. В [6,

7] этот подход был применен для синтеза ПИ- и ПИД-регуляторов для систем, в которых на объект не действуют внешние возмущения (ни уставка, ни возмущения), а движение в ней вызвано ненулевыми начальными условиями. В настоящем докладе этот подход применяется для синтеза ПИД-регуляторов к классической задаче синтеза следящей системы.

Рассмотрим полностью управляемый и наблюдаемый объект управления вида

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t); \\ y(t) = c^T x(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ – состояние объекта, причем $x(0) = 0$, $u(t) \in R$ – сигнал управления, $y(t) \in R$ – измеряемый выход объекта; матрицы и векторы A, b, c^T известны и имеют соответствующие размеры, при этом предполагается, что $c^T b = 0$.

Управление формируется ПИД-регулятором следующего вида:

$$\begin{aligned} u(t) &= k_p e(t) + k_I \int_0^t e(\tau) d\tau + k_D \dot{e}(t), \\ e(t) &= y^* - y(t) = y^* - c^T x(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где $K = [k_p \quad k_I \quad k_D]^T$ – вектор параметров регулятора, подлежащий определению, $e(t)$ – сигнал рассогласования, $y^* \equiv 1$ – единичное ступенчатое задающее воздействие (уставка). Предполагается, что существует известный стабилизирующий ПИД-регулятор K_0 .

Система (1), (2) представляет собой следящую систему с единичным задающим сигналом. Задача синтеза заключается в определении вектора параметров K ПИД-регулятора, который:

- обеспечивает устойчивость замкнутой системы (1), (2),
- минимизирует квадратичный функционал

$$J(K) = \int_0^\infty e^2(t) dt + \rho |K|^2, \quad (3)$$

где второе слагаемое играет роль регуляризационной поправки с весовым коэффициентом $\rho > 0$, позволяющей избегать значительного возрастания управления.

Решение данной задачи можно реализовать в форме линейно-квадратичной задачи, используя подход, предложенный в [6]. Вводится новая переменная $\dot{z}(t) = y^* - c^T x(t)$ и расширенный вектор состояния

системы $\tilde{x}^T(t) = \begin{bmatrix} x^T(t) & z(t) \end{bmatrix}$. Используя эти обозначения, системы (1), (2) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}}(t) &= \tilde{A}(K)\tilde{x}(t) + \tilde{b}(K)y^*; \\ y &= [c^T \quad 0]\tilde{x}(t), \end{aligned} \quad (4)$$

где матрицы $\tilde{A}(K)$, $\tilde{b}(K)$ имеют следующую структуру:

$$\tilde{A}(K) = \begin{bmatrix} A - k_p b c^T & -k_D b c^T & A & k_I b \\ & -c^T & & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{b}(K) = \begin{bmatrix} k_p b \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Согласно [8], сигнал рассогласования системы (4) при единичном задающем воздействии имеет вид:

$$e(t) = [c^T \quad 0](\tilde{x}(t) - x_{st}) = [c^T \quad 0]e^{\tilde{A}(K)t} \tilde{A}^{-1}(K) \tilde{b}(K),$$

где $x_{st} = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{x}(t) = -\tilde{A}^{-1}(K) \tilde{b}(K)$.

В [8] показывается, что в этом случае задача минимизации $\|e(t)\|_2$ сводится к анализу системы с ненулевыми начальными условиями $x_0(K) = \tilde{A}^{-1}(K) \tilde{b}(K)$. Для того, чтобы использовать этот прием для решения задачи (3) при помощи подхода, предложенного в [6, 7], необходимо зафиксировать начальные условия. В настоящем докладе при решении задачи оптимизации начальные условия объекта (1) выбираются по известному заданному начальному ПИД-регулятору: $x_0 = \tilde{A}^{-1}(K_0) \tilde{b}(K_0)$.

Задача синтеза свелась к задаче минимизации функционала (3), решение которой осуществляется методом, подобным методу сопряженных градиентов: выбор направления выполняется в соответствии правилами метода сопряженных градиентов, но полная релаксация по длине шага заменяется линейным поиском по правилу Армихо.

Эффективность предложенного подхода можно продемонстрировать на примере синтеза ПИД-регуляторов для модели объекта управления, часто используемой на практике [9]; она описывается передаточной функцией:

$$G(s) = \frac{1}{(1+s)^4},$$

Объект управления представляет передаточную функцию с собой объект с четырьмя кратными единичными полюсами и без нулей.

В качестве начального выберем ПИД-регулятор $K_0 = [2,131 \quad 0,503 \quad 2,255]^T$. Синтез выполнялся для следующих значений весового коэффициента $\rho = 0,5; 1; 10; 50$, результаты представлены в таблице 1: первая строка содержит значения ρ , вторая – найденный оптимальный ПИД-регулятор, третья – частота среза разомкнутой

системы, позволяющая оценить быстродействие замкнутой системы, и четвертая – запасы устойчивости по фазе и модулю.

Таблица 1

Результаты синтеза ПИД-регуляторов для $G(s)$

Коэффициент ρ	0,5	1	10	50
Оптимальный регулятор K^*	$\begin{bmatrix} 0,7099 \\ 0,0298 \\ -0,0215 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,5232 \\ 0,0423 \\ -0,0584 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,128 \\ 0,0569 \\ -0,0224 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0,0337 \\ 0,0471 \\ -0,0064 \end{bmatrix}$
Функционал $J(K^*)$	2,6328	2,8181	3,41	3,6904
Частота среза $\omega_{ср}$	0,0421	0,0495	0,0571	0,0469
Запасы устойчивости $[L, \varphi_3]$	$[5,23 \ 125^\circ]$	$[6,28 \ 110^\circ]$	$[14,5 \ 84,2^\circ]$	$[16,1 \ 81,2^\circ]$

Как следует из таблицы 1, для всех значений ρ запасы устойчивости являются вполне приемлемыми с инженерной точки зрения ($L > 2$ и $\varphi_3 > 30^\circ$), а быстродействие системы сначала увеличивается, а затем уменьшается. Значение целевой функции $J(K^*)$ увеличивается с увеличением коэффициента ρ .

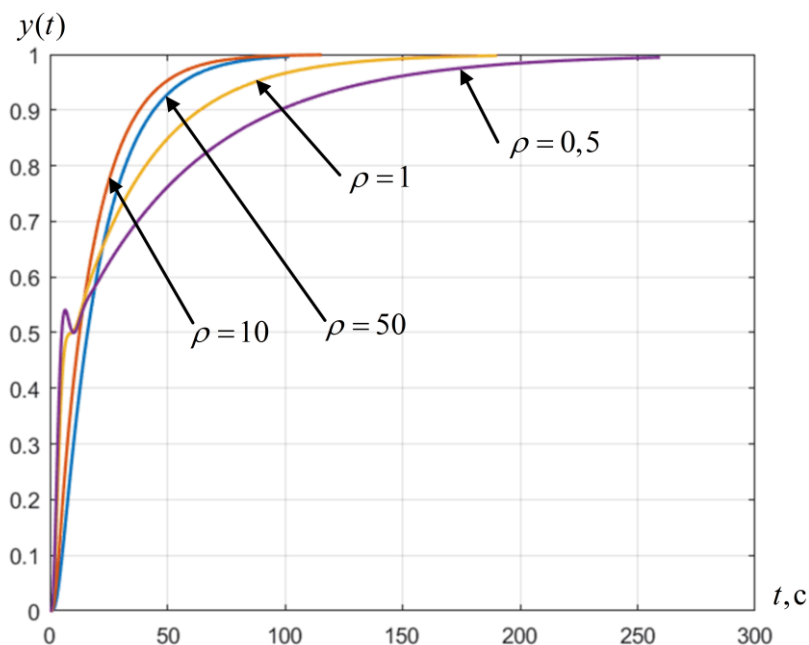


Рис. 1. Моделирование замкнутой системы (1), (2) для $G(s)$ при различных значениях ρ

На рис. 1 изображены графики выходного сигнала объекта $y(t)$ при моделировании замкнутой системы с единичной ступенчатой уставкой. Отметим улучшение качества переходных процессов при увеличении ρ до 10, без заметного ухудшения показателей запасов устойчивости.

Библиографический список

1. Åström, K.J. Advanced PID control / K.J. Åström, T. Hägglund. – NC: ISA, 2006. – 460 p.
2. Visioli, A. Practical PID control / A. Visioli. – London: Springer-Verlag, 2006. – 310 p.
3. O’Dwyer, A. Handbook of PI and PID controller tuning rules (3rd edition) / A. O’Dwyer. – London: Imperial College Press, 2009. – 608 p.
4. Wang, L. PID Control System Design and Automatic Tuning using MATLAB/Simulink / L. Wang. – N.J.: Wiley-IEEE Press, 2020. – 368 p.
5. Fatkhullin, I. Optimizing Static Linear Feedback: Gradient Method / I. Fatkhullin, B. Polyak // SIAM Journal on Control and Optimization. – 2021. – Vol. 59, No. 51. – P. 3887–3911.
6. Поляк, Б.Т. Новые критерии настройки ПИД-регуляторов / Б.Т. Поляк, М.В. Хлебников // Автоматика и телемеханика. – 2022. – № 11. – С. 62–82.
7. Шатов, Д.В. Синтез параметров ПИ- и ПИД-регуляторов для стационарных линейных объектов с ненулевыми начальными условиями / Д.В. Шатов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2023. – № 1. (в печати)
8. Поляк, Б.Т. Большие отклонения в линейных системах при ненулевых начальных условиях / Б.Т. Поляк, А.А. Тремба, М.В. Хлебников, П.С. Щербаков, Г.В. Смирнов // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 6. – С. 18–41.
9. Åström, K.J. Benchmark systems for PID control / K.J. Åström, T. Hägglund // IFAC Proceedings Volumes. – 2000. – Vol. 33, No. 4. – P. 165–166.

СЕКЦИЯ IV
УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ
И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

УДК 519.171.2

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АГЕНТОВ
СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ
МОДЕЛЕЙ ГРАФОВ

О.А. Волгина, П.А. Нечаева

В данной работе показано, что агентные модели позволяют исследовать внутренние процессы элементов сложных динамических систем, таких как социальные сети. Описаны метод исследования и способ программной реализации модели, выбранной для изучения процессов распространения активности в сложных сетевых системах. Приведено обоснование выбора моделей графов, наиболее подходящих для изучения социально-психологических феноменов динамики мнений в сетях.

Ключевые слова: социальные сети, распространение активности в сети, имитационное моделирование, агентное моделирование, теория графов, модели графов.

За последние два десятилетия, с появлением современной науки о сетях, было проведено значительное число исследований в этой области. Социальные сети рассматриваются как среда со сложной структурой, которая динамично меняется и с трудом поддается анализу. Основным предметом изучения выступает процесс распространения наблюдаемого возбуждения в сети и выполнения агентами действий - процесс формирования и изменения мнений. В научной литературе описано значительное количество теоретических и численных методов, разработанных для изучения процессов распространения активности в сложных сетевых системах. Показано, что имитационные модели позволяют моделировать и оценивать комплекс наиболее значимых и релевантных социально-психологических феноменов динамики мнений в сетях.

На основе анализа существующей литературы можно выделить несколько основных типов распространения активности в сетях.

Модели коллективного поведения с порогами разрабатываются для ситуаций, когда у агентов есть две альтернативы, а издержки и/или выгоды каждой из них зависят от того, какую альтернативу выбирает большинство

других агентов. Ключевым понятием данной модели является «порог»: количество или пропорция других участников сети, которые должны принять одно решение, прежде чем это сделает данный агент [1].

Модели независимых каскадов показывают, что активность узлов сети подчиняется закону масштабирования временных колебаний и эта особенность выявляется посредством использования независимой каскадной модели [2].

Теоретико-игровые модели представляют собой формальные методы анализа стратегического взаимодействия между конечным числом агентов. Такие модели основываются на информированности и взаимосвязи между агентами [3].

Сетевые модели автокорреляции используются для анализа социальных явлений, в том числе распространения идей внутри сети [4].

В моделях подражательного поведения в качестве параметров выбраны автономность агента и его зависимость от информации, получаемой в процессе наблюдения за другими агентами [5].

Каждый из описанных выше методов имеет ряд преимуществ, однако метод агентного моделирования на сегодняшний день является наиболее адаптивным для моделирования внутренних процессов таких динамических социальных систем, как социальные сети. Такие модели позволяют моделировать и оценивать комплекс наиболее значимых и релевантных социально-психологических феноменов динамики мнений в сетях.

При моделировании социальных сетей, взаимного влияния их членов (агентов), динамики их мнений необходимо учитывать факторы, присутствующие в реальной жизни. При анализе реальных социальных сетей учитывают наличие мнения у агента, степень его доверия к другим агентам сети, уровень подверженности влиянию извне. Введение порога в агентную модель позволяет контролировать установленный уровень подверженности агента влиянию и моделировать процесс изменения мнений агентов при множественном взаимном влиянии друг на друга, что максимально приближено к реальному процессу принятия решения пользователями.

Основой настоящего исследования стала описанная ранее агентная пороговая модель гетерогенной сети [6]. Каждый агент такой сети обладает уникальным набором параметров, определяющих его поведение. Каждый агент имеет множество входов, а также он способен генерировать информацию нескольких типов и подавать ее на множество выходов. В рамках исследования данная модель была программно реализована с использованием элементов теории графов, а именно различных графовых моделей.

Графы широко используются при исследовании социальных сетей для решения различных задач, связанных с моделированием и анализом

структуры сети, моделированием взаимодействия участников, анализом поведения пользователей и многими другими связанными аспектами. Особенность выбранной модели обуславливает тот факт, что все рассматриваемые в исследовании графы являются ориентированными.

Использование различных графовых моделей в исследовании позволило выявить эффекты, вызванные различным законом распределения связей в графе. С точки зрения математического подхода любая выбранная модель построения графа имеет право на существование. Однако одна графовая модель может представлять больший интерес с точки зрения распределения связей, чем другая. Соответственно было необходимо подобрать такие модели, которые будут представлять наибольший интерес при моделировании социальных сетей.

В первую очередь для чистоты исследования был выбран полный граф (рис. 1). Построение сетей на полном графе позволяет выявить закономерности обусловленные полнотой связей между узлами. При этом граф не отражает реальную картину мира, но является неотъемлемой частью экспериментального исследования и формулировок выводов по результатам.

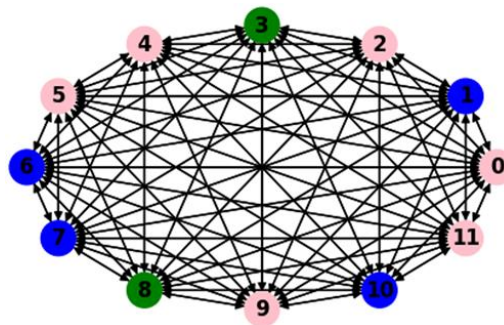


Рис. 1. Полный граф

Модель случайного графа Эрдеша-Реньи (рис. 2) отличается простотой, но при этом часто используется для получения различных аналитических оценок.

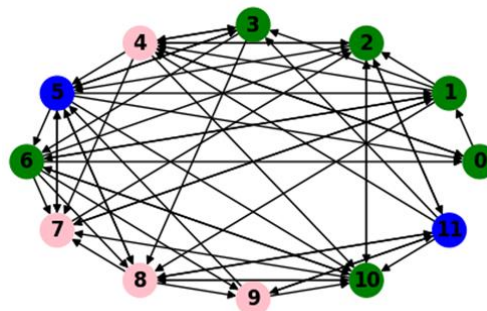


Рис. 2. Модель Эрдеша-Реньи

Важно отметить, что данная модель не реализует многие свойства реальных социальных сетей, например, степень вершин и коэффициент кластеризации. Главные предположения модели Эрдеша-Реньи о независимости ребер и их равновероятностном появлении также не приемлемо для описания явлений реальной жизни. Низкая кластеризация графов Эрдеша-Реньи ограничивает его применения при моделировании, но распределение связей в графе позволяет определять различные эффекты.

Более приближенными к реальным сетям являются модели графов Барабаши-Альберт и Уоттса-Строгаца. Модель Барабаши-Альберт (рис. 3) – это модель со степенным распределением, способная генерировать безмасштабные сети. Безмасштабность свойственна многим как природным, так и созданным человеком сетям. Так, например, сеть Интернет и некоторые социальные сети безмасштабны.

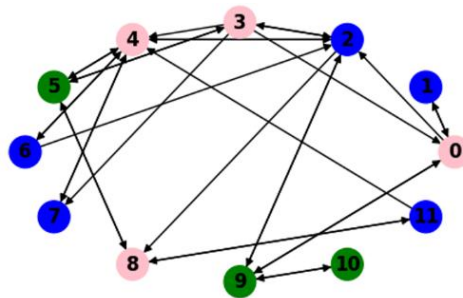


Рис. 3. Модель Барабаши-Альберт

У данной модели есть два ценных для исследования свойства: возможность роста и применение принципа предпочтительного соединения. Два этих свойства широка распространены в реальных сетях. Рост сети – это увеличение количества узлов во времени. Принцип предпочтительного присоединения основан на том, что узлы с большим количеством связей с большей вероятностью создают новые связи.

Модель генерации случайных графов Уоттса-Строгаца (рис. 4), создает графы со свойствами тесного мира, в частности с короткой средней длиной пути и высокой кластеризацией.

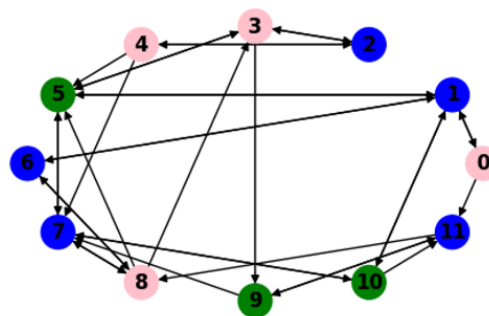


Рис. 4. Модель Уоттса-Строгаца

Модель графа Уоттса-Строгаца является простейшей моделью, учитывающей кластеризацию сетей с сохранением короткой средней длины пути. Это достигается путем включения случайной структуры, близкой к графам модели Эрдеша-Реньи, в регулярную кольцевую решетку. Следовательно, модель способна, по крайней мере, частично объяснить феномен «шести рукопожатий мира» в различных сетях [7].

Модель Уоттса-Строгаца ограничена нереалистичным распределением градусов в ней. В этом плане социальные сети лучше описываются семейством моделей предпочтительного присоединения, например, моделью Барабаши-Альберт. Так же модель Уоттса-Строгаца строится при фиксированном количестве узлов сети, что становится препятствием для моделирования процесса роста. Данная модель, имеющая высокую кластеризацию, больше всего подходит для описания сетей с несколькими сообществами внутри.

В общем случае, ни одна из моделей не может полностью описывать реальные социальные сети, однако экспериментальное моделирование на данных сетях позволит выявить различные эффекты, вызванные законами распределения связей между узлами графовых моделей. Подобные модели за последние десятилетия зарекомендовали себя с точки зрения математики, а также в рамках разнообразных эффектов, среди которых рост сетей интернета и других социальных и биологических сетей.

Для экспериментального моделирования динамики сети было разработано приложение для визуализации распространения активности ММО-агентов.

В качестве способа программной реализации было выбрано веб-приложение. Данный способ удобен для реализации интерфейса, загрузка осуществляется по ссылке без скачивания, приложение использует минимум ресурсов.

В качестве метода исследования был выбран вычислительный эксперимент – метод изучения явлений или процессов с помощью математического моделирования. Данный метод использует формат генерации гипотез для доказательства или опровержения путем проведения количественных экспериментов. Гипотеза доказывается или опровергается статистическими средствами.

Методика экспериментов заключалась в переборе входных параметров как сети, так и внутренних состояний агентов. Исследование было проведено при различных топологиях, в том числе и на основе объединения нескольких сетей с одним и несколькими общими агентами (рис. 5).

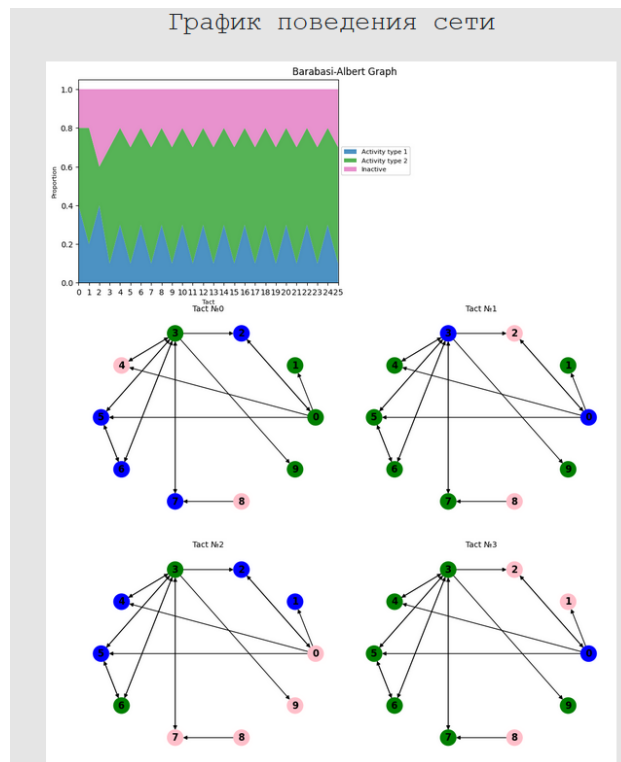


Рис. 5. Пример динамики сети

На основе проведенного экспериментального исследования были получены следующие выводы:

1) информация в сильно связанных графах, таких как полный граф и граф Эрдеша-Реньи передается быстрее по сравнению с более разреженными графами;

2) сильно связанные графы менее чувствительны к повышению порогов активации агентов, так как высокие значения компенсируются большим количеством связей в графе;

3) в относительно разреженных графах, таких как графы Уотса-Строгаца и Барабаша-Альберт увеличение интервала разброса порогов приводит к возрастанию числа неактивных агентов.

Данные утверждения являются справедливыми для реальных социальных сетей, что оправдывает популярность агентных моделей при изучении процесса распространения активности в социальных сетях, и доказывает работоспособность конкретной реализации выбранной гетерогенной модели. Также важно отметить значимость обоснованного выбора моделей графов для моделирования топологий сетей в экспериментальном исследовании.

Заключение. Таким образом, в ходе исследования были рассмотрены основные типы моделей распространения информации, были сформулированы преимущества метода агентного моделирования. Для программной реализации была выбрана описанная ранее пороговая

агентная модель, в которую были встроены четыре различные модели графов. Каждая модель графа была выбрана на основе ее свойств, которые отражают один из феноменов сетей реального мира. Было проведено несколько серий экспериментов на основе выбранного метода исследования. Выводы, сделанные по полученным результатам, очевидны и совпадают с реальными фактами. На основе этого можно утверждать о возможности использования конкретной реализации модели для исследования процесса распространения активности в социальных сетях, а также об адекватном выборе моделей графов, использованных в исследовании.

Библиографический список

1. Granovetter, M. Threshold models of collective behavior / M. Granovetter // *American journal of sociology*. – 1978. – Vol. 83, No 6. – P. 1420–1443.
2. Gao, J. General threshold model for social cascades: Analysis and simulations / J. Gao, G. Ghasemiefteh, G. Schoenebeck, F. Y. Yu // *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Economics and Computation*. – 2016. – P. 617–634.
3. Yadati, N. Game theoretic models for social network analysis / N. Yadati, R. Narayanam // *Proceedings of the 20th international conference companion on World wide web*. – 2011. – P. 291–292.
4. Dittrich, D. Network autocorrelation modeling: Bayesian techniques for estimating and testing multiple network autocorrelations / D. Dittrich, R. Leenders, J. Mulder // *Sociological Methodology*. – 2020. – Vol. 50, No 1. – P. 168–214.
5. Губанов, Д.А. Многомерная модель динамики мнений в социальных сетях: индексы поляризации / Д.А. Губанов, И.В. Петров, А.Г. Чхартишвили. // *Проблемы управления*. – 2020. – № 3. – С. 26–33.
6. Zhilyakova, L.Yu. Modeling the Structure of MIMO-Agents and Their Interactions / L.Yu. Zhilyakova, S. Kuznetsov, A. Panov // *Artificial Intelligence. RCAI 2019. Communications in Computer and Information Science*. – 2019. – Vol. 1093. – P. 3–16.
7. Райгородский, А. М. Модели случайных графов / А. М. Райгородский, 2-е изд.– М: МЦНМО, 2011. – 144 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОТИВОБОРСТВА: ТЕОРИЯ АРГУМЕНТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ФЕЙКОВЫЕ НОВОСТИ

И.В. Козицин

В данной работе строится оригинальная агентная модель, позволяющая исследовать процессы, связанные с распространением фейковых новостей в онлайн среде в условиях, когда два актора являются противоборствующими сторонами информационного конфликта. Модель позволяет изучать влияние активности агентов, устройства алгоритмов ранжирования и топологии социальной сети на динамику системы. В основе информационных процессов модели лежит Теория аргументных взаимодействий (Argument communication theory). В рамках настоящей работы строится расширение данной теории, учитывающее достоверность контента, а также его убедительность. Кроме того, предлагается допущение о том, что множество аргументов не фиксировано, а динамически обновляется. Такая постановка является более точным описанием реального мира, в котором новостные источники ежедневно транслируют истории и факты, выступающие базисом для формирования новых аргументов.

Ключевые слова: фейковые новости, динамика мнений, алгоритмы ранжирования.

Введение. Интенсификация информационных процессов, вызванная стремительным развитием Интернета и онлайн сетей способствует продвижению фейковых новостей онлайн среде, которые несут значительную угрозу для устойчивого развития общества [1]. Вместе с тем использование фейкового контента позволяет некоторым заинтересованным акторам оказывать значительное влияние на общественное мнение, поскольку фейковые новости зачастую более виральны и могут обладать большей убеждающей силой [2].

В данной работе строится оригинальная агентная модель, позволяющая исследовать процессы, связанные с распространением фейковых новостей в онлайн среде в условиях, когда два актора являются противоборствующими сторонами информационного конфликта. Модель позволяет изучать влияние активности агентов, устройства алгоритмов ранжирования и топологии социальной сети на динамику системы. В основе информационных процессов модели лежит Теория аргументных взаимодействий (Argument communication theory), предложенная в работах [3], [4] и получившая затем развитие в работах [5]–[7]. В рамках настоящей

работы строится расширение данной теории, учитывающее достоверность контента, а также его убедительность. Кроме того, предлагается допущение о том, что множество аргументов не фиксировано, а динамически обновляется. Такая постановка является более точным описанием реального мира, в котором новостные источники ежедневно транслируют истории и факты, выступающие базисом для формирования новых аргументов. Необходимо отметить также, что предлагаемая модель является обобщением ранее опубликованной модели [8].

Краткий обзор модели. Модель призвана имитировать информационные процессы внутри некоторой онлайн-сети, в результате которых меняются мнения пользователей. Рассматривается закрытая система из $N + 2$ агентов, связанных социальной сетью $G = (V, E)$. Множество V описывает вершины сети, а E – связи между ними. Вершины индексируются от 1 до $N + 2$. Вершины с индексами 1 и 2 – это агенты, соответствующие актерам – сторонам информационного конфликта. Содержательно это могут быть информационные источники в реальных онлайн-сетях (далее этих агентов будем называть информационными источниками), а остальные агенты соответствуют обычным пользователям (далее – просто агенты). Связи между агентами являются двусторонними, а ребра, соединяющие агентов и информационные источники – односторонние, направленные в сторону от агентов. Информационные источники не могут быть связаны друг с другом. Однако возможны ситуации, когда один агент подписан одновременно на оба информационных источника. Время в модели дискретно. Такты времени группируются в эпохи. Одна эпоха состоит из $N + 2$ тактов. В рамках каждой эпохи первые два такта закреплены за информационными источниками. Очередность хода определяется случайно. В оставшиеся такты времени действуют агенты: каждый такт времени выбирается случайным образом (равновероятно) один из агентов, который может осуществить ряд действий, которые будут описаны ниже.

Аргументы и мнения. Ключевым элементом модели являются аргументы – кванты информации, которые участвуют в формировании мнений на основании так называемой оценочной структуры (evaluative structure) [7]. Для обозначения аргументов используется символ “ a ”. Каждый аргумент a характеризуется триплетом $a = (s, w, f)$, где s определяет валентность аргумента (+1 или -1), w задает вес данного аргумента в оценочной структуре (принимает значения от нуля включительно до плюс бесконечности), а f является индикатором того, что данный аргумент является фейком (к примеру, основан на ложном факте) и принимает значения +1 (фейк) или -1 (не фейк). Каждый агент характеризуется кортежем дуплетов, описывающим аргументы, о которых знает агент:

$$A = ((a_1, e_1), \dots, (a_m, e_m)).$$

Аргументы, которые приняты агентом (см. далее), обозначаются флагом $e_i = 1$. Если аргумент a_i не был принят, то в таком случае $e_i = 0$. Мнение агента строится на основании d последних аргументов кортежа (а точнее тех из них, что были приняты):

$$o = \sum_{k=m-d+1}^m e_k s_k w_k$$

(число d моделирует когнитивные ограничения людей, которые не могут хранить и обрабатывать в голове неограниченное количество информации). Построенное таким образом пространство мнений соответствует вещественной оси. У разных агентов кортежи могут иметь различную длину. В начальный момент времени все кортежи агентов пусты и мнения агентов тем самым равны нулю.

Информационные источники. Ход информационного источника состоит в публикации поста. Каждый пост p в момент времени t характеризуется кваттетом

$$p = (i, t_0, a, l),$$

где i – индекс автора поста, t_0 – время публикации (такт), a – аргумент, который присутствует в посте и l – число лайков, которые собрал пост к моменту времени t . В момент создания пост не имеет лайков: $l(t_0) = 0$. Аргумент поста генерируется при создании последнего информационным источником как случайная величина. Информационные источники генерируют новые (уникальные) аргументы. При создании поста информационный источник $i \in \{1, 2\}$ обращается к одномерному распределению N_i . На основании этого распределения генерируется случайная величина ξ_i . Эта случайная величина порождает аргумент, инициализируемый следующим образом:

$$a = (\text{sgn } \xi_i, |\xi_i|, f).$$

Если не указано обратное, то считаем $f = 0$. Информационный источник i публикует пост с вероятностью α_i .

Цели, которые преследуют информационные источники, могут состоять в изменении мнений агентов и максимизации числа подписчиков. Далее для ясности будем считать, что информационный источник с индексом 1 тяготеет к левой стороне пространства мнений, а информационный источник с индексом 2 – к правой. Математически это выражается в том, что распределение N_2 находится правее N_1 .

Информационные источники 1 и 2 публикуют посты в свои ходы с вероятностями θ_1 и θ_2 соответственно.

Агенты и их действия. Каждый агент при активации может выполнить следующие три действия: опубликовать пост; смотреть новостную ленту; блуждать по онлайн-сети (surf the Internet). Эти действия совершаются независимо друг от друга с вероятностями β , γ и δ соответственно. Порядок действий также определяется случайным образом (равновероятно). Опишем, что происходит в рамках каждого из этих действий.

Действие «Опубликовать пост». Данное действие идентично тому, что делают информационные источники с одной поправкой: агенты, в отличие от информационных источников, не генерируют новые аргументы, а оперируют теми, которые входят в их картели аргументов. Иными словами, только информационные источники могут создавать новые аргументы. Более точно, агент, кортеж аргументов которого описывается $A = ((a_1, e_1), \dots, (a_m, e_m))$, для создания поста использует последний принятый элемент кортежа a_i (с $e_i = 1$) при условии, что $i > m - d$. Если кортеж аргументов агента пуст или же последние d его элементов характеризуются флагом $e = 0$, то тогда агент не может выполнить данное действие, и ничего не происходит. Последняя ситуация является достаточно «экзотичной», интерес представляет сама возможность существования такой конфигурации кортежа аргументом.

Действие «Смотреть новостную ленту». В рамках данного действия агент просматривает посты, опубликованные его соседями по социальной сети (под соседями подразумеваются все инцидентные вершины независимо от типа связи (двусторонняя / односторонняя)). Агент имеет доступ к постам, опубликованным с момента его последней активации: если агент последний раз активировался в такт времени t , то тогда, будучи активированным в такт T , ему будут видны посты, опубликованные инцидентными вершинами в моменты времени $t + 1, t + 2, \dots, T - 1$ (если таковые найдутся). Множество таких постов обозначим $P_{t,T}$. Из этого множества Алгоритм ранжирования R (см. далее) выбирает один пост $p = R(P_{t,T})$, который затем просматривается агентом. Если множество $P_{t,T}$ пустое, то ничего не происходит.

Действие «Блуждание по онлайн-сети». При совершении данного действия агент с вероятностью ε может посетить аккаунт каждого из информационных источников (можно считать, что выбор информационных источников равновероятен, однако в дальнейшем целесообразно рассмотреть более точные приближения реальных процессов, в рамках которых вероятность посетить аккаунт положительно связана с числом подписчиков данного аккаунта). Данное действие не зависит от того, подписан ли агент на конкретный информационный источник или нет. При посещении агент видит последний пост, опубликованный данным информационным источником.

Просмотр поста агентом. Данный процесс является основным механизмом передачи информации и, тем самым, оказания влияния в рамках модели. Просмотр поста агентом может возникнуть в рамках действий «Смотреть новостную ленту» и «Блуждание по онлайн-сети». Пусть агент, характеризуемый кортежем аргументов $A = ((a_1, e_1), \dots, (a_m, e_m))$ и мнением $o = \sum_{k=m-d+1}^m e_k s_k w_k$ наблюдает пост p , несущий аргумент a (с валентностью s и весом w).

Если аргумент a уже входит в кортеж A с флагом $e = 1$, то тогда агент может с вероятностью ζ поставить лайк данному посту. Если, кроме того, пост опубликован информационным источником, на который агент не подписан, то агент может на него подписаться с вероятностью η . Отметим, что постановка лайка и подписка на информационный источник реализуются как независимые события.

Если аргумент a не принадлежит кортежу A , то агент может либо принять аргумент ($e = 1$), либо отвергнуть его ($e = 0$). В результате кортеж аргументов примет вид $A = ((a_1, e_1), \dots, (a_m, e_m), (a, e))$, а мнение станет равно

$$o = \sum_{k=m-d+2}^m e_k s_k w_k + esw.$$

Если агент отвергает аргумент и если пост был опубликован информационным источником, на который подписан агент, то тогда агент может отписаться от данного информационного источника с вероятностью θ .

Принятие / непринятие аргумента агентом. Чтобы задать правило, на основании которого агенты принимают или отвергают аргументы, введем величину, описывающую когерентность когнитивной конфигурации кортеж A – мнение $o(A)$:

$$C(A, o(A)) = C(A) = \sum_{k=m-d+1}^m (E_k s_k w_k) * \sum_{k=m-d+1}^m e_k s_k w_k,$$

где $E_k = 2e_k - 1$ – величина, принимающая значения $+1$ или -1 . Когерентность растет в случае, если кортеж пополняется аргументами, коррелирующими с текущим мнением агента, а значит коррелирующими с аргументами, которые были приняты агентом ранее. Когерентность также положительно связана с отвергнутыми аргументами, отрицательно коррелирующими с текущим мнением.

Предлагаемое определение для когерентности является обобщением аналогичной конструкции, предложенной в работе [7]. Эмпирические исследования свидетельствуют о том, что люди стремятся получать информацию извне, которая подтверждает их взгляды (смещенная

обработка информации – biased processing). В связи с этим, аналогично работе [7], будем считать, что, обрабатывая новый для себя аргумент, агент ориентируется на то, как изменится когерентность когнитивной конфигурации в случае его принятия:

$$V(A, a) = C \left(\underbrace{(a_1, e_1), \dots, (a_m, e_m)}_A, (a, 1) \right) - C(A).$$

Вероятность принятия аргумента агентом λ определяется через логистическую модель:

$$\lambda = \frac{1}{1 + e^{-\mu V(A, a)'}}$$

где (неотрицательная) величина μ регулирует силу эффекта смещенной обработки информации.

Алгоритм ранжирования. В рамках модели предлагается рассмотреть три алгоритма ранжирования. Первый (R_1) из множества постов $P_{i,T}$ выбирает самый новый. Второй алгоритм (R_2) предлагает для агента пост с наибольшим числом лайков. Если таковых несколько, то выбирается самый новый пост. Третий алгоритм ранжирования (R_3) подбирает пост с аргументом, который больше всего будет способствовать увеличению когерентности когнитивной конфигурации агента. Опять же, если таких постов несколько, то приоритет будет отдан самому свежему посту.

Фейковые аргументы. Информационные источники, которые генерируют новые аргументы для системы, могут повлиять на свойства новых аргументов, поступившись их “правдивостью”. Более точно, информационный источник i вместо распределения N_i может использовать другое вероятностное распределение F_i , однако в результате сформированный аргумент будет иметь следующую структуру:

$$a = (\text{sgn } \xi_i, |\xi_i|, 1),$$

то есть будет фейковым. Предполагается, что распределение F_i лучше отвечает целям информационного источника, чем распределение N_i (F_1 расположено левее N_1 и F_2 расположено правее N_2).

Разоблачение фейковых аргументов. Будем предполагать, что в моделируемой онлайн-сети работает механизм разоблачения фейков. С некоторой периодичностью с вероятностью ν происходит процедура проверки достоверности аргументов: случайным образом выбирается один из существующих аргументов $a = (s, w, f)$. Если $f = 0$ (аргумент основан на правдивой информации), то ничего не происходит. В случае если $f = 1$, то тогда все агенты узнают об этом и в их кортежах рядом с этим аргументом устанавливается флажок $e = 0$. Кроме того, при разоблачении аргумента те агенты, которые ранее его приняли,

отписываются (если уже подписаны) с вероятностью φ от информационного источника, который сгенерировал данный аргумент.

Заключение. В данной работе была построена оригинальная агентная модель, позволяющая исследовать процессы, связанные с распространением фейковых новостей в онлайн среде в условиях, когда два информационных источника являются противоборствующими сторонами информационного конфликта. Модераторами распространения информации являются алгоритмы ранжирования, а также сама структура онлайн сети, связывающая агентов и информационные источники. Рис. 1 кратко демонстрирует устройство модели. Следующим шагом будет исследование феноменологии модели при помощи численных экспериментов для различных значений ее гиперпараметров.

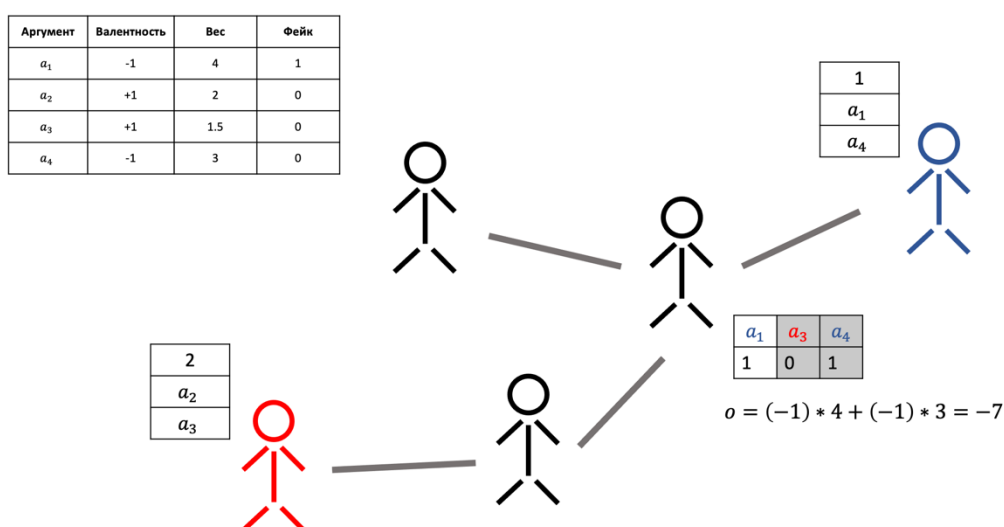


Рис. 1. Скetch модели. Агенты (черные иконки) связаны друг с другом и с информационными источниками (цветные иконки). Информационный источник, представленный красной иконкой, генерирует аргументы, которые характеризуются положительной валентностью, а «синий» информационный источник производит аргументы с отрицательной валентностью. При этом веса этих аргументов выше, чем у красного информационного источника, но за это приходится платить их правдивостью – аргумент a_1 является фейком. В связи с этим, если данная ложь будет разоблачена, то агент, когнитивная структура которого представлена на рисунке (подписан на синий информационный источник), меняет свое мнение (оно станет равно -3) и отпишется от синего информационного источника с вероятностью φ . Структура социальной сети такова, что фокальный агент мог получить аргумент a_3 двумя способами: (1) через агента, подписанного на красный информационный источник или (2) если ранее фокальный агент был подписан на красный информационный источник, но затем отписался от него.

Настоящая версия модели предполагает, что связи между агентами статичны. Однако этого нельзя сказать про всю сеть целиком: последняя

самоорганизуется таким образом, чтобы агенты были подписаны на информационные источники, когерентные их собственным взглядам. Данные допущения подтверждаются эмпирическими исследованиями, утверждающими, что связи между обычными пользователями характеризуются достаточно низкими показателями гомофилии (по мнениям), в то время как графы, соединяющие пользователей и информационные источники обладают резко выраженной гомофилией (селективная экспозиция) [9]. Тем не менее, перспективным видится внедрение в модель механизмов динамики социального графа, соединяющего агентов и анализ влияния данной модификации на поведение модели.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-11-20059).

Библиографический список

1. Khan, T. Fake news outbreak 2021: Can we stop the viral spread? / T. Khan, A. Michalas, A. Akhuzada // *Journal of Network and Computer Applications*. – 2021. – Vol. 190. – P. 103112.
2. Del Vicario, M. The spreading of misinformation online / M. Del Vicario, A. Bessi, F. Zollo, F. Petroni, A. Scala, G. Caldarelli, H. E. Stanley, W. Quattrociocchi // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2016. – Vol. 113, No. 3. – P. 554–559.
3. Mäs, M. Differentiation without distancing. Explaining bi-polarization of opinions without negative influence / M. Mäs, A. Flache // *PloS one*. – 2013. – Vol. 8, No. 11. – P. e74516.
4. Mäs, M. In the short term we divide, in the long term we unite: Demographic crisscrossing and the effects of faultlines on subgroup polarization / M. Mäs, A. Flache, K. Takács, K. A. Jehn // *Organization science*. – 2013. – Vol. 24, No. 3. – P. 716–736.
5. Banisch, S. An Argument Communication Model of Polarization and Ideological Alignment / S. Banisch, E. Olbrich // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2021. – Vol. 24, No. 1.
6. Betz, G. Natural-Language Multi-Agent Simulations of Argumentative Opinion Dynamics // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. – 2022. – Vol. 25, No. 1.
7. Banisch, S. Biased processing and opinion polarization: experimental refinement of argument communication theory in the context of the energy debate / S. Banisch, H. Shamon // [Электронный ресурс] SSRN 3895117. – 2021.
8. Kozitsin, I.V. Users' Activity in Online Social Networks and the Formation of Echo Chambers / I.V. Kozitsin, A.G. Chkhartishvili // 2020 13th International Conference "Management of large-scale system development"(MLSD). – IEEE, 2020. – 5 p.

9. Haghtalab, N. Belief polarization in a complex world: A learning theory perspective / N. Haghtalab, M. O. Jackson, A. D. Procaccia // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2021. – Vol. 118, No. 19. – P. e2010144118.

УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫМ РАЗВИТИЕМ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ: ПРОБЛЕМЫ И ПОДДЕРЖКА НА ОСНОВЕ СЦЕНАРНОГО ПОДХОДА

Н.В. Команич

В работе рассматриваются проблемы современной нефтегазовой комплекс России и его инновационного развития, пути поддержки управления, направленного на изменения в данной сфере на основе сценарного подхода с учетом существующих тенденций. Целью работы является анализ возникающих ситуаций и проблем, применение сценарного подхода для выработки и принятия управленческих решений, на основе разработанной имитационной модели, в которую включены основные факторы, характеризующие состояние нефтегазового сектора России в контексте мировой конкуренции, современных отраслевых проблем и внешних воздействий. Также отражено функционирование отраслевых научных исследований, влияющих непосредственно на вклад в отраслевую науку. Акцент работы сделан на рассмотрении существующих проблем нефтегазового сектора России и их разрешении путем принятия управленческих решений, используя методы сценарного подхода.

Ключевые слова: нефтегазовый комплекс, инновационное развитие, энергетические ресурсы, разработка недр, сценарное моделирование, имитационная модель, прогнозирование, управление.

На данный момент России остро необходимы изменения в формировании современной структуры экономики и выбора направлений для решения данной проблемы. Одним из главных направлений при анализе существующего рынка и состояния нашей экономики является необходимость в обеспечении развития новых высокотехнологичных и наукоемких инновационных отраслей, направленных на поддержание и развитие тех сфер экономики, которые связаны с эксплуатацией природных ресурсов. Как показывает время, нефтегазовая отрасль является ключевой в развитии экономики нашей страны, поддержанию энергетического комплекса и одной из самых высокотехнологичных отраслей. В последние годы приверженность инновациям является необходимой тенденцией в развитии нефтегазовой промышленности [1].

Инновационный потенциал нефтегазового комплекса (НГК) России является стратегическим фактором устойчивого роста экономики нашей страны, позволяющий повысить эффективность экономического и энергетического секторов, преодолеть или ослабить влияние дефицитных

факторов производства. Освоение энергетических ресурсов неразрывно связано с широкомасштабным использованием технических новшеств, для этого необходима интеграция в области науки и образования с ведущими национальными и мировыми компаниями и университетами.

На данный момент при наличии достаточного количества энергетических ресурсов и повышения цен и спроса существуют существенные проблемы современного развития нефтяного комплекса в нашей стране, которые способны решить научно-исследовательские изыскания в данной отрасли [2]:

1) нерациональное недропользование (низкий коэффициент извлечения запасов нефти 25-35%) и неудовлетворительная деятельность по воспроизводству минерально-сырьевой базы;

2) рост себестоимости добычи нефти на новых месторождениях;

3) проблема переработки и утилизации нефтяного попутного газа;

4) высокая степень износа основных фондов нефтеперерабатывающей промышленности, трубопроводных мощностей и низкое качество нефтепродуктов. У большинства российских НПЗ высокая степень износа основных фондов (до 70 %);

5) низкие темпы применения новых технологий и инноваций в разработке новых месторождений, освоения шельфовых, морских месторождений и глубоководных горизонтов;

6) сокращение активных геологоразведочных работ, снижение резервных объектов, из чего следует падение прироста запасов;

7) закупка иностранного оборудования, низкие темпы разработки российских технологий.

Существует ряд внешних факторов, которые влияют на инновационное развитие нефтегазовой отрасли, которые происходят из конкурентоспособности нашей страны, политической и экономической стратегии, отсутствия регулирующего законодательства инновационной деятельности и наличия специализированных кадров.

1. На данный момент в виду усугубления внешнеполитических отношений нашей страны с ведущими странами мира и поступающих пакетов санкций против нашей страны усугубляется партнерская деятельность, снижается как внутреннее, так и внешнее инвестирование. Также происходят изменения в экспортной деятельности нашей страны в нефтегазовой сфере.

2. Нестабильность современной ситуации привела к повышению цен на добычу энергетических ресурсов. Данная проблема приводит к повышению цен, но при возрастающем спросе возникает проблема в целевой покупательной способности на сырье и производимые из него продукты. Такая тенденция ведет к снижению рентабельности

предприятий, работы энергетического комплекса, работы компаний, тесно связанных с использованием продуктов нефтегазовой промышленности.

3. Отсутствие действующего законодательства по контролю и развитию инновационной деятельности приводит к разногласиям, непониманию между государством, научными деятелями и нефтегазовыми компаниями, к отсутствию конкретного и стратегического плана по разработке инноваций, их применению и внедрению, к отсутствию программ по сценарному и стратегическому анализу добычи и использования энергетических ресурсов.

4. Недостаточность финансирования инновационной деятельности предприятиями по добыче и переработке энергоресурсов в связи с высокой стоимостью внедрения и освоения нововведений, а также долгосрочностью вложений [3].

На данный момент существует ряд рекомендаций по развитию нефтегазового комплекса и рынка в нашей стране. Во-первых, необходимо срочное увеличение геологоразведочных работ на новых неразрабатываемых участках. Во-вторых, увеличение объемов извлекаемых запасов на существующих месторождениях путем внедрения новых технологий, направленных на снижение издержек по извлечению сырья, повышению эффективности использования сопутствующих минералов и газа. В-третьих, улучшение обработки сырья для получения высококачественных продуктов (бензина, авиационного и ракетного топлива, солярки, мазута).

Снижение издержек при добыче, транспортировке и переработке нефти и газа может привести к повышению прибыльности. В перспективе при улучшении внешней политической и экономической обстановки в мире развитие данной сферы позволит не только сохранить лидерство в добыче и экспорте данных природных ресурсов, но и повысить конкурентоспособность на мировой арене.

С недавнего времени был поставлен вопрос об освоении энергоресурсов Арктики и шельфовых месторождений [4]. В виду сложности добычи нефти в этих регионах разработка месторождений в данных экстремальных условиях зависит от соответствующих эффективных научных изысканий, направленных на разработку и производство современных российских нефте/газодобывающих комплексов, предусматривающих решение всех факторы трудно разрабатываемых мест залежей. Открываемые и разрабатываемые месторождения являются перспективными для увеличения числа резервных объектов, что приведет к резкому приросту национальных запасов и стратегических энергетических резервов.

Также научные исследования должны затрагивать такие аспекты, как экологическая безопасность нашей страны, предусматривать комплексные

межотраслевые меры по полной переработке сырья, утилизации отходов бурения, промышленности, жизнедеятельности и предотвращению возникновения чрезвычайных происшествий. Минимизировать воздействие на организм человека и других живых существ выбросов при технологических циклах нефтеперерабатывающих заводов. Реализовать комплексы по использованию и переработке отходов пород для повышения эффективности использования разрабатываемых недр.

К слову, создание подразделений на добывающих предприятиях, в нефтегазовых компаниях и на уровне государства, которые бы отвечали непосредственно за инновации и инновационное развитие позволило бы увеличить эффективность научно-технического прогресса в данной сфере, целенаправленно привлекать научных деятелей и структуры для разработки соответствующих программ, алгоритмов инновационной деятельности, разработки необходимого научно-технического оборудования и комплексов. Межотраслевое сотрудничество с общими целями по стратегическому и инновационному развитию затрагиваемой сферы, приведет к повышению эффективности использования нефтегазового комплекса и продуктов его эксплуатации. К примеру нефтегазовые компании могли бы начать тесное сотрудничество с энергетическими компаниями и государством для реализации программ по использованию добываемых углеводородных ресурсов.

На данный момент развитие нефтегазовой отрасли в нашей стране зависит от специализированного технического оборудования и инновационных технологических решений, направленных на решение проблемы импортозамещения. Решение проблем реализации программ по инновационному развитию принятию управленческих воздействий в нефтегазовой отрасли и сотрудничеству с научно исследовательскими организациями в сфере разработки нефтегазового технического комплекса по добыче, переработки и транспортировки состоит в использовании сценарного моделирования и прогнозирования. Данный подход служит для решения сложных задач с имеющимися неопределенностями с прогнозированием последствий от принимаемых управленческих воздействий при генерировании различных сценариев развития обстановки при наличии ограничений на виды воздействий [5].

В основе сценарного подхода лежит формирование и исследование сценарной имитационной модели, которая служит, прежде всего, в качестве средства объединения и согласования знаний, полученных из разных источников, об объекте моделирования и его окружения.

При построении модели необходимо определить наиболее значимые внешние и внутренние факторы, оказывающие положительное и негативное влияние на развитие нефтегазовой отрасли в виду

взаимодействия с результатами научной деятельности научно-технических центров.

Эффективность вклада отраслевой науки в инновационное развитие России зависит от финансового и ресурсного обеспечения. Потребность в развитии инноваций заставляет нефтегазодобывающие и энергетические структуры повышать количество целевых заказов и грантов по отраслевым и межотраслевым направлениям для получения научно-практических результатов в развитии и снижения себестоимости нефтяной и газовой добычи, многопрофильной переработки, расширения и повышения качества выпускаемой номенклатуры товаров, что ведет к повышению финансирования. Развитие отраслевой науки ведет к росту научно-технического прогресса (НТП), качественному подъему материального производства, повышению эксплуатационных характеристик продукции, а также к уменьшению технических издержек на добычу, обработку и производство нефтегазовых продуктов. Положительные результаты деятельности отраслевой науки приводят к повышению конкурентоспособности нашей страны, ведущей к увеличению рейтинга национальных компаний на мировой арене, повышению добываемого углеводородного сырья, росту закупок и экспорта нефти, газа и получаемых из них продуктов. Путем увеличения геологоразведочных работ наша страна увеличивает количество действующих и резервных месторождений, происходит рост резервных национальных запасов. Правильное финансирование и управление внедряемыми технологиями, техническим оборудованием, их использовании, постройка новых направлений трубопровода может привести к снижению внутренних цен на рынке, качественному росту цен на экспорт и увеличению заказов.

Нефтегазовая промышленность тесно связана с энергетическим комплексом. В виду этого, развитие добывающей и производственной сырьевой отрасли оказывает положительное влияние на развитие топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Повышение энергоэффективности внутри нашей страны приведет к повышению стабильности и государственной безопасности, снижению затрат и цен на электроэнергию.

Разработанная модель зависимости инновационного развития нефтегазового комплекса от вклада отраслевой науки представлена на рисунке 1. Модель основана на: состоянии и взаимодействии российского и мирового нефтегазового рынка; методах оценки работы научно-исследовательских организаций и их деятельности; результатах влияния отраслевой науки на развитие НГК; методах по борьбе с негативным внутренним и внешним влиянием; задействованы рассуждения о повышении конкурентоспособности нашей страны.

Целью моделирования является оценка влияния отраслевой науки и развития инноваций с учетом их финансирования на количество добываемых ресурсов, их эксплуатацию и экспорт, разработку новых действующих месторождений и создание стратегических энергетических резервов, развитие конкурентоспособности государством и развитие цен [2].

В ходе сценарного моделирования был получен сценарий (рис 2.), которые отражают непротиворечивость изложенных выше умозаключений и непротиворечивость построенной имитационной модели. Результаты отраслевой науки, при совместном финансировании и кооперативном управлении государством и нефтегазовыми компании, выдачи новых грантов и заказов научно-исследовательским центрам положительно сказывается на динамике роста стратегических нефтяных резервов, конкурентоспособности России и рентабельности инвестиций в НГК. На первоначальных этапах происходит рост издержек и инвестиции исходя из длительного жизненного цикла проведения научных исследований и внедрения инноваций. В конечном итоге введения в действия изменений необходимость больших инвестиции отпадает и приводит к их снижению. Также непротиворечивость модели подтверждает тот факт, что при правильном принятии управленческих воздействий во время моделирования цены внутреннего рынка начали падать.

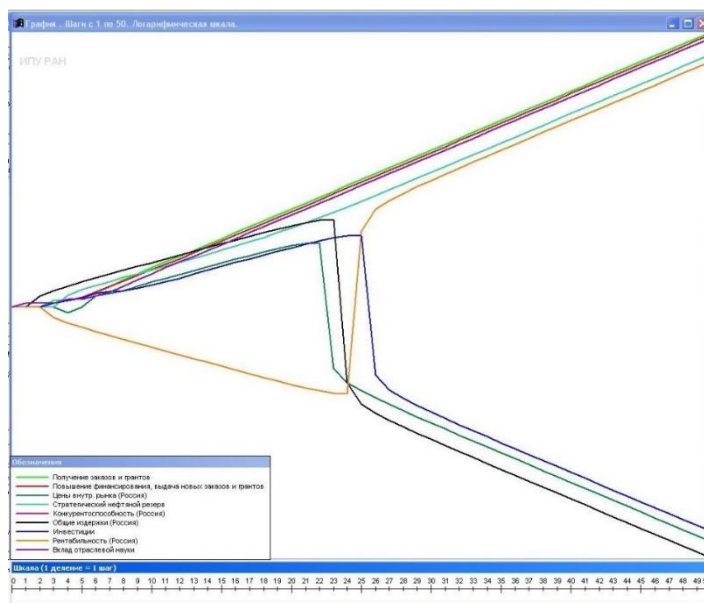


Рис. 2. Результаты сценарного моделирования

Заключение. Рост мировой конкуренции и потребления нефти, газа и получаемых из них номенклатуры продуктов и товаров приводит к необходимости инновационного развития нефтегазовой отрасли России. Повышение рейтинга нашей страны в данной отрасли является

стратегическим шагом на пути первенства по добыче и экспорту углеводородного сырья и его продуктов, развитию экономики и энергетики, улучшению безопасности, повышению стратегического энергетического резерва. Для решения существующих отраслевых проблем необходимо развитие и финансирование отраслевой науки. Главными стратегическими направлениями нашей страны в данной области является разработка новых месторождений и разработка отечественных технологий по добыче и обработке добываемого сырья. На основе анализа данных и факторов, влияющие на когнитивно-информационные процессы была сформирована сценарная имитационная модель взаимосвязи развития нефтегазовой отрасли, вклада отраслевой науки в это развитие, государственного и отраслевого финансирования и создания заказов и грантов на научные исследования в этой сфере. Выявлены позитивные и негативные факторы, влияющие на развитие отраслевой науки и нефтегазового комплекса, выделены основные факторы, участвующие в деятельности научно-исследовательских организаций и нефтегазового рынка. Проведен сценарный анализ развития научно-исследовательской работы в нефтегазовом секторе и степень ее влияния на отрасль. В результате сценарного моделирования выявлены существующие проблемы и угрозы в этой области. Сформированная модель и сценарии, разработанные на ее основе, могут лечь в основу принимаемых решений в развитии отрасли, поможет в прогнозировании необходимых результатов и рисков, поиску путей их разрешения.

Библиографический список

1. Куклина, Е.А. Инновационная деятельность предприятий нефтегазового сектора России в условиях новых вызовов энергетического рынка / Е.А. Куклина // Экономика нового мира. – 2018. – №. 3 (11). – С. 5-20.
2. Фадеев, А.М. Проблемы и возможности инновационного развития нефтегазового комплекса: стратегическое видение / А.М. Фадеев, Ф.Д. Ларичкин, А.Е. Череповицын // Вестник МГТУ. Мурманск. – 2011. – Т. 14, № 2. – С. 447–451.
3. Сайфуллина, С.Ф. Проблемы инновационного развития российских предприятий / С.Ф. Сайфуллина // Успехи современного естествознания. – 2010. – Т. 3. – С. 171–173.
4. Фадеев, А.М. Стратегическое управление нефтегазовым комплексом в Арктике: монография / А.М. Фадеев, А.Е. Череповицын, Ф.Д. Ларичкин. – Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2019. – 289 с.
5. Шульц, В.Л. Управление региональной безопасностью на основе сценарного подхода / В.Л. Шульц, В.В. Кульба, А.Б. Шелков, И.В. Чернов. – М.: ИПУ РАН, 2014. – 163 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИГРАХ С РАЗЛИЧНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА

В.О. Корепанов, А.И. Блохина

Проведен анализ данных, полученных в ходе экспериментальных игр с различными механизмами распределения ресурса. Выясняется наличие связи между поведением участников эксперимента и механизмами, порядком игр, возможностью достижения консенсуса, а также субъективными оценками механизмов. Поведение игроков исследуется с точки зрения рационального поведения и поведения, связанного с улучшениями по Парето. Определено соответствие между решениями игроков и начисляемыми им штрафами. Установлено, что для двух рассматриваемых механизмов, УН и ADMM, поведение, связанное с улучшениями по Парето, в большинстве случаев совпадает со стремлением уменьшить штраф.

Ключевые слова: распределение ресурса, дизайн механизмов, деловые игры, улучшения по Парето, рациональное поведение.

Задача распределения ресурса между несколькими агентами в условиях, когда агенты обладают частной информацией и имеют интерес в том, чтобы скрывать или искажать ее, может быть решена с помощью специальных механизмов взаимодействия агентов, при которых они сами, действуя рационально, могут прийти к оптимальному распределению ресурса. Несколько таких механизмов и проведенные по ним экспериментальные деловые игры описываются в работе [1]. В данной статье приводятся результаты дальнейшего анализа части этих экспериментальных данных, а именно – игр по двум механизмам, УН [2] и ADMM [3].

Модель. В рассматриваемой модели $n = 3$ агента, между которыми распределяется некоторый ресурс в количестве $R = 115$. Полезность агента i определяется функцией u_i : $u_i = \sqrt{r_i + x_i}$, где $r = (1, 9, 25)$ – типы функций полезности, а x_i – ресурс, присвоенный данному игроку. Оптимальным считается распределение, при котором сумма полезностей игроков максимальна. Игра представляет собой итерационный процесс: на каждом шаге k каждый из игроков делает заявку s_i^k , то есть количество ресурса, которое он запрашивает, в зависимости от механизма, для себя или для всех игроков; заявки игроков обрабатываются в соответствии с правилами механизма, игрокам сообщается результат – распределение

ресурса между игроками на данном шаге. Набор заявок $s^k = (s_1^k, s_2^k, \dots, s_n^k)$ называется ситуацией на шаге k . Игра заканчивается либо, когда достигается максимальное число шагов, заранее известное участникам, либо если все участники подали ту же заявку, что и на предыдущем шаге. В последнем случае мы считаем, что игроки таким образом выразили согласие с предложенным распределением ресурса и игра окончилась консенсусом. Игры проводились по пяти механизмам распределения ресурса, причем в разных экспериментах порядок проведения игр был различным. Здесь рассматриваются игры по двум механизмам: Yang-Hajek и ADMM.

Механизм УН. На каждом шаге игрок делает заявку $s_i^k \in \mathbb{R}_+$. Игроку присваивается количество ресурса, равное

$$x_i^k = \frac{s_i^k}{S^k} R, \#(1)$$

где

$$S^k = \sum_{i=1}^n s_i^k.$$

Игрок также на каждом шаге выплачивает трансфер:

$$t_i^k = \beta S_{-i}^k s_i^k, \#(2)$$

где $S_{-i}^k = S^k - s_i^k$, $\beta = 5 \times 10^{-4}$.

Механизм ADMM. Количество ресурса, присваиваемого игроку на каждом шаге, равно его заявке: $x_i = s_i \in \mathbb{R}_+$. На каждом шаге игрок выплачивает трансфер, равный

$$t_i^k = \beta (s_i^k - s_i^{k-1} + \overline{x^{k-1}} - \frac{R}{n} + y^{k-1})^2,$$

где $\beta = 5 \times 10^{-4}$,

$$\begin{aligned} s_i^0 &= R/n, \\ \overline{x^{k-1}} &= 1/n \sum_{j=1}^n x_j^{k-1}, \\ y^k &= \overline{x^k} - R/n + y^{k-1}, \\ y^0 &= 0. \end{aligned}$$

Для всех механизмов выигрыш игрока на шаге k определяется как полезность, полученная от выданного ресурса на данном шаге, из которой вычтен трансфер на данном шаге: $\varphi_i^k = u_i^k - t_i^k$. Финальный выигрыш определяется как выигрыш на последнем шаге игры.

Более подробно процесс игры, механизмы распределения ресурса и проведение экспериментов описываются в [1] и [4].

Модели поведения. В результате проведения экспериментов имеются данные о решениях (заявках) игроков, распределении ресурса на каждом шаге, трансферах и выигрышах, а также о том, достигали ли игроки консенсуса. В работах [5], [6] эти данные анализируются с точки зрения рационального поведения, константного поведения и поведения,

основанного на решении Нэша для торгов. В этой статье будут рассматриваться модели рационального поведения и поведения, основанного на улучшениях по Парето, описанные ниже.

Рациональное поведение. Модели рационального поведения основаны на наилучшем ответе игрока для ситуации на предыдущем шаге:

$$br_i(s^{k-1}) = \operatorname{argmax}_{y \in \mathbb{R}_+} \varphi_i(y_i, s_{-i}^{k-1}),$$

где s_{-i}^{k-1} – заявки, сделанные остальными игроками (кроме игрока под номером i) на шаге k . Заявку s_i^k мы называем близкой к наилучшему ответу с точностью ε ($BR(\varepsilon)$), если

$$|s_i^k - br_i(s^{k-1})| < \varepsilon;$$

заявку s_i^k мы называем направленной в сторону наилучшего ответа ($TwBR$), если

$$\begin{cases} s_i^k = s_i^{k-1}, & \text{если } br_i(s^{k-1}) = s_i^{k-1} \\ \frac{s_i^k - s_i^{k-1}}{br_i(s^{k-1}) - s_i^{k-1}} > 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

заявку s_i^k мы называем рациональным поведением, если

$$\varphi_i(s_i, s_{-i}^{k-1}) > \varphi_i(s^{k-1}).$$

Поведение, приводящее к улучшению по Парето. Заявку s_i^k мы называем сильным улучшением по Парето (PI), если

$$\forall j: \varphi_j(s_i^k, s_{-i}^{k-1}) > \varphi_j(s^{k-1}).$$

Результаты. В работе [5] показано, что поведение, основанное на решении Нэша для торгов связано с достижением консенсуса в механизме УН. Такое поведение в нашем случае совпадает с поведением, основанном на Парето-улучшениях, рассматриваемом в данной статье. Для механизма ADMM частота такого поведения также выше в играх, окончившихся консенсусом.

Была изучена связь между штрафами и PI поведением в двух механизмах. Заявка s_i^k в играх с механизмом УН может быть PI только тогда, когда игрок стремится уменьшить свой штраф (то есть $t(s_i^k, s_{-i}^k) < t(s^{k-1})$) и уменьшает свою заявку. Действительно, если игрок увеличивает свою заявку s_i^k , а остальные игроки не меняют своих заявок, то увеличиваются штрафы всех игроков (в формуле (2) для игрока i увеличивается третий множитель, для остальных – второй); выигрыши всех игроков, кроме i при этом уменьшаются, так как увеличивается знаменатель в формуле (1). При этом уменьшение штрафа не обязательно является PI поведением: в 63 % случаев стремление уменьшить штраф в играх по механизму УН не было PI поведением.

Правила механизма ADMM, в отличие от УН, не предполагают зависимость между уменьшением штрафа и PI поведением. Однако 81 %

шагов, являющихся PI поведением в играх по ADMM, были направлены на уменьшение штрафа. При этом доля шагов, направленных на уменьшение штрафа в консенсус и не-консенсус игах по ADMM отличается слабо (41,4 % и 38,9 % соответственно).

Исследовалось изменение поведения игроков при изменении механизма. На рис. 1–3 показаны доли PI, BR(1) и TwBR поведения участников, которые участвовали в играх по обоим механизмам. Каждая точка на графиках соответствует одному игроку. Цвет точки зависит от достижения консенсуса: если обе игры данного участника, окончились консенсусом, точка зеленого цвета; если ни одна из игр не окончилась консенсусом – красного; если окончилась консенсусом только игра по механизму ADMM – фиолетового (случаев, когда для участника консенсусом окончилась только игра по YH, не было).

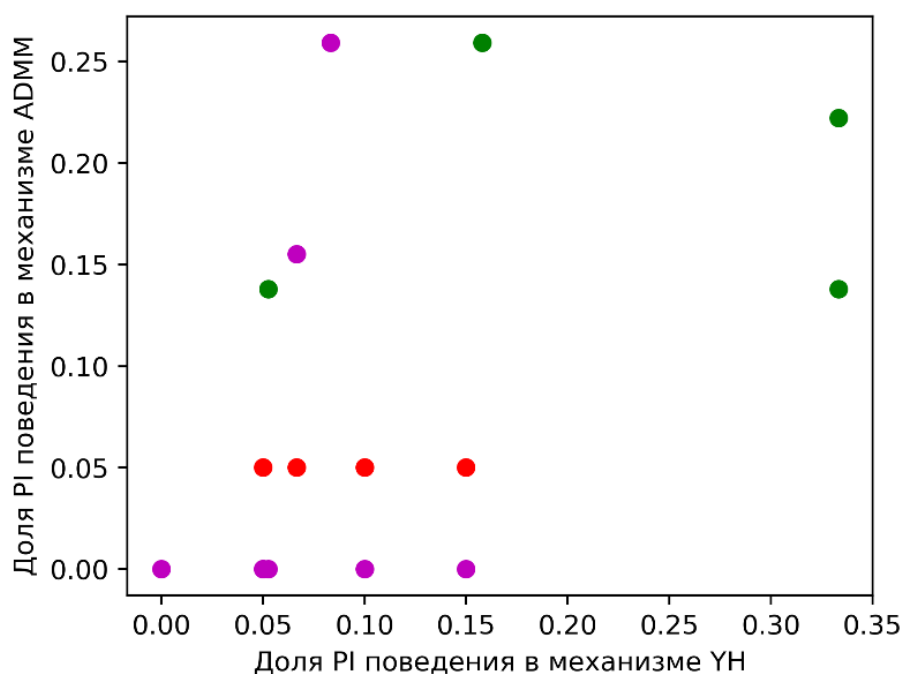


Рис.1. Доля PI поведения в играх YH и ADMM

Из 14 участников, которые проявляли PI поведение хотя бы в одной игре, 8 проявляли его в обеих играх, а 6 – только в одной; трое из четырех участников, достигших консенсуса в обеих играх, применяли PI часто в каждой игре.

Из 11 игроков, которые проявляли BR (1) поведение в двух играх, 4 проявляли такое поведение в одной игре и 7 – в обеих.

Таким образом, в дальнейшем можно проверять гипотезы о том, что PI поведение устойчиво относительно изменения механизмов (то есть каждый участник с большей вероятностью будет проявлять PI поведение в нескольких играх, чем только в одной), а BR (1) – нет.

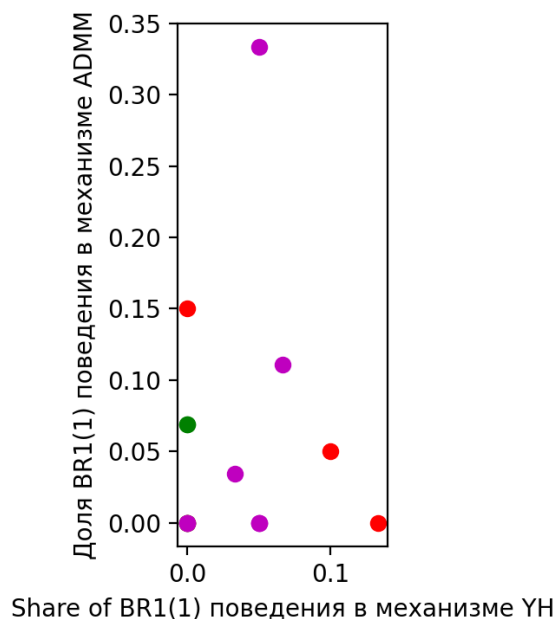


Рис. 2. Доля решений, соответствующих наилучшему ответу с точностью 1, в играх YH и ADMM

Из 16 участников, которые проявляли TwBR поведение хотя бы в одной игре, 15 делали это в обеих играх. Однако, поскольку TwBR описывает только направление действий игрока, она является менее точной, чем остальные модели поведения.

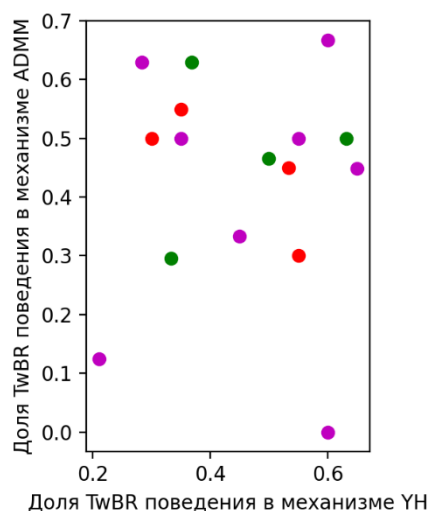


Рис. 3. Доля решений, направленных в сторону наилучшего ответа, в играх YH и ADMM

Изменение поведения участников в зависимости от порядка игр проиллюстрировано рис. 4. Здесь также каждая точка соответствует одному участнику. Если он играл сначала по механизму YH, точка красного цвета, если по механизму ADMM – синего.

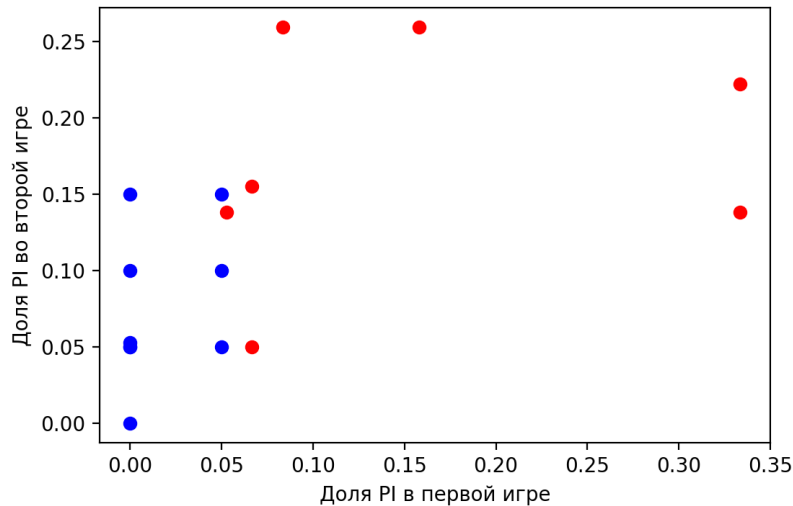


Рис. 4. Доля PI решений игроков в первой и второй играх

Корреляция между долями решений, являющихся улучшением по Парето, в первой и второй играх (независимо от механизма), составляет около 0.59.

Была проверена следующая гипотеза: если участник проявляет PI поведение в своей первой игре, то он будет чаще проявлять его во второй игре, чем тот, кто не проявлял PI поведение в первой игре. Применение U-критерия Манна-Уитни показало, что эта гипотеза не может быть принята, однако ее стоит проверить на большем объеме данных.

В семи играх по УН, которые были первыми играми, средняя доля PI-решений составляет 15,6; в девяти играх УН, которые были вторыми играми, средняя доля PI-решений составляет 7,8%, то есть в два раза меньше, чем в первых УН-играх. Аналогичные результаты для механизма ADMM: в случаях, когда это была первая игра, средняя доля PI-решений составляла 1,6%; когда ADMM было второй игрой, средняя доля PI-решений составляла 18%, то есть игроки намного чаще проявляют PI поведение в играх ADMM, если играют в нее после УН.

Участники имели возможность оценить механизмы на основании того, насколько они подходят для решения задачи распределения ресурса; лучшая оценка – 1, худшая – 5. Мы пытались установить, есть ли связь между поведением игроков и оценками, которые они давали механизмам.

На графиках на рисунках 5–6 показана доля решений каждого игрока в одном механизме, соответствующих определенной модели поведения, и оценка, которую этот игрок поставил механизму. Каждая точка соответствует одному игроку. Зеленый цвет означает, что игра окончилась консенсусом, красный – что консенсус в игре не был достигнут.

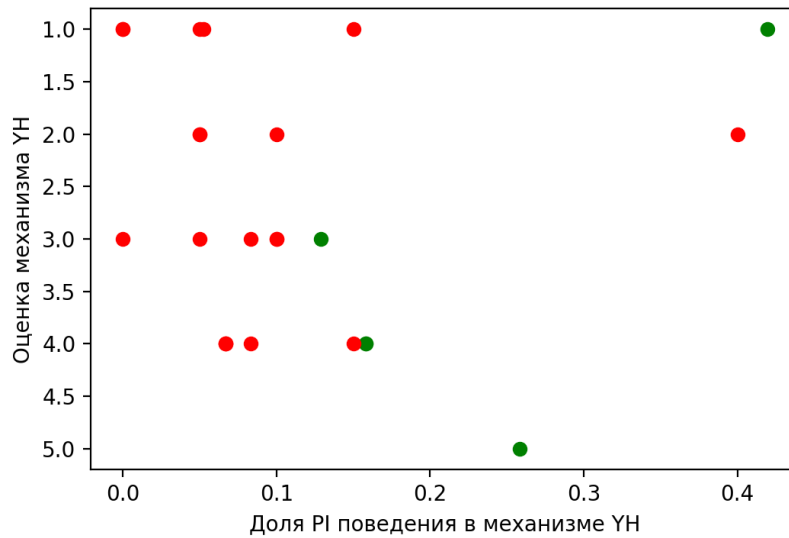


Рис. 5. Доля PI поведения в играх YH и оценки

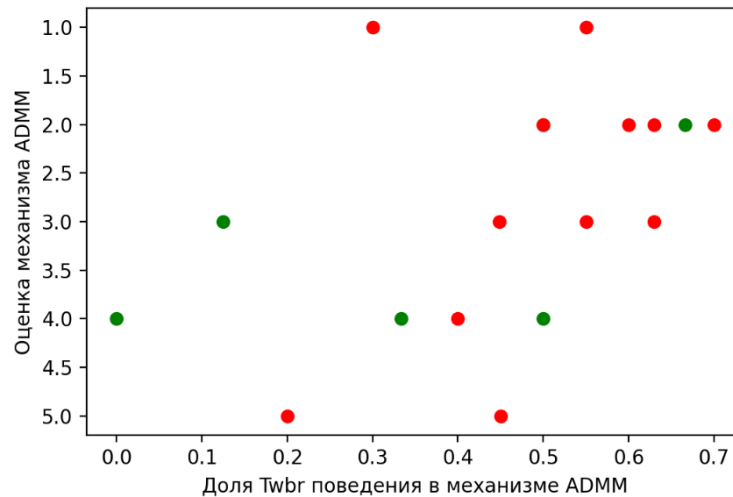


Рис. 6. Доля TwBR поведения в играх ADMM и оценки

По механизму YH может существовать обратная зависимость оценки механизма от доли PI. Возможно, присутствует прямая зависимость между долей TwBR и оценкой механизма ADMM.

Заключение. Было исследовано влияние механизма и порядка игр на поведение людей. Для механизма YH получены данные о влиянии PI поведения на размер выигрышей и штрафов игроков, а также о связи такого поведения со стремлением уменьшить размер штрафа.

На частоту проявления поведения, основанного на Парето-улучшениях, в играх по механизму ADMM может влиять порядок игр: игроки, участвовавшие в ADMM после YH, чаще делают PI заявки.

PI поведение в механизме УН всегда является стремлением уменьшить штраф для всех игроков. В дальнейшем предлагается рассмотреть такое поведение с точки зрения уменьшения штрафа, а не Парето-улучшений.

Библиографический список

1. Korgin, N.A. Experimental gaming comparison of resource allocation rules in case of transferable utilities / N. A. Korgin, V.O. Korepanov // International Game Theory Review. – 2017. – Vol. 19, No 2.
2. Yang, S. Revenue and stability of a mechanism for efficient allocation of a divisible good [Электронный ресурс] / S. Yang, B. Hajek. – illinois.edu, 2007. – URL: <http://hajek.ece.illinois.edu/Papers/YangHajek06.pdf> (дата обращения: 15.04.2022).
3. Boyd, S. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers / S. Boyd, N. Parikh, E. Chu et al. // Foundations and Trends in Machine learning. – 2011.– Vol. 3, No 1. – P. 1–122.
4. Korgin N. A., Korepanov V. O. Experimental gaming analysis of ADMM dynamic distributed optimization algorithm / N.A. Korgin N, V.O. Korepanov //IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, No. 12. – P. 574–579.
5. Korgin N. A., Korepanov V. O. Nash bargaining solution as negotiation concept for resource allocation problem: analysis of experimental data / N.A. Korgin, V.O. Korepanov // Contributions to Game Theory and Management. – 2020. – Vol. 13, No. 1. – P. 207–217.
6. Корепанов, В.О. Константное поведение в деловых играх распределения ресурса: устойчивость к дизайну игр и модель / В.О. Корепанов // Проблемы управления. – 2020. – №. 4. – С. 41–51

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ И НЕЕДИНСТВЕННОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ В СТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОТКРЫТОГО РЫНКА

А.М. Котюков

Исследована модель открытого рынка, в которой функции спроса и предложения восстановлены по известным эластичностям. Получены достаточные условия неединственности положений равновесия в модели. Эти условия получены как следствия теорем о мощности множества точек совпадения накрывающего и липшицевого отображений.

Ключевые слова: накрывающее отображение, модель открытого рынка, спрос, предложение, положение равновесия, точка совпадения.

Положение равновесия является основным объектом исследования современной экономики. Поясним содержание этого понятия. Пусть на рынке присутствуют две группы участников: производители и потребители. Первые имеют технологии производства и используя их выпускают товары, которые впоследствии продаются потребителям. Вторые же, в свою очередь, приобретают предлагаемые товары в нужном им количестве. Совокупный объем произведенных товаров называется предложением, а совокупный объем потребляемого товара – спросом. Очевидно, что спрос на рынке не должен превышать предложение – действительно, в таком случае в моделируемом регионе возникнут неблагоприятные последствия (голод, болезни, нищета и др.). С другой стороны, предложение не должно превышать спрос, так как, с одной стороны, это ведет к уменьшению бюджета потребителей, что негативно сказывается на их покупательской способности, а с другой – к перепроизводству и увеличению убытков производителей. Из этих соображений можно сделать вывод, что лучшей ситуацией на рынке будет та, при которой совокупный спрос равен совокупному предложению, или, проще, спрос равен предложению. Такая ситуация называется экономическим равновесием, а цены, при которых данная ситуация сформировалась – равновесными.

Одно из первых упоминаний экономического равновесия принадлежит Адаму Смиту в работе «Исследование о природе и причинах богатства народов» в 1776 году [1], в которой был сформулирован так называемый «принцип невидимой руки», согласно которому рыночное равновесие устанавливается в точке пересечения кривых спроса и предложения. Спустя почти 100 лет Вальрас смог придать этой идее первую математическую трактовку [2]. В конце XIX века математический аппарат был недостаточно

развит для исследования вопроса об условиях существования положения равновесия даже в линейных моделях. Первые законченные результаты о существовании положения равновесия были получены Эрроу и Дебре [3] только в 1956 году.

Благодаря результатам в теории накрывающих отображений и точек совпадения [4,5,6] удается получить достаточные условия существования положения равновесия и в случае нелинейных моделей, что позволяет получить содержательные результаты в области современной прикладной экономики. Более того, эти результаты также позволяют построить алгоритм поиска положения равновесия в случае его существования [7].

В настоящей работе исследуется вопрос об устойчивости положения равновесия в статической модели рынка с известными эластичностями, а также вопрос о неединственности этого положения в модели. Соответствующие теоремы получены как следствия теорем о точках совпадения накрывающего и липшицевого отображений.

Пусть известны:

- 1) число $n \in \mathbb{N}$ – число товаров на рынке;
- 2) векторы $c_1, c_2 \in \mathbb{R}_+^n$, $c_1 = (c_{11}, \dots, c_{1n})$, $c_2 = (c_{21}, \dots, c_{2n})$ такие, что $c_{1i} < c_{2i} \forall i = \overline{1, n}$ – естественные ограничения на цены на товары (обозначим $P = [c_{11}; c_{21}] \times \dots \times [c_{1n}; c_{2n}]$);
- 3) вектор $p^* = (p_1^*, \dots, p_n^*) \in \mathbb{R}_+^n$ такой, что $p_i^* \in P$ – текущие цены на товары;
- 4) значения спроса и предложения при известных ценах \bar{p}^* :
 $D^*, S^* \in \mathbb{R}_+^n$, $D^* = D(p^*) = (D_1^*, \dots, D_n^*)$, $S^* = S(p^*) = (S_1^*, \dots, S_n^*)$;
- 5) квадратные матрицы $\mathcal{E} = (E_{ij})_{i,j=\overline{1,n}}$, $\tilde{\mathcal{E}} = (\tilde{E}_{ij})_{i,j=\overline{1,n}}$ порядка n – матрицы эластичностей спроса и предложения по цене соответственно, где элементы этих матриц описываются формулами:

$$E_{ij} = \frac{\partial D_i p_j}{\partial p_j D_i}, \tilde{E}_{ij} = \frac{\partial S_i p_j}{\partial p_j S_i}, \quad i, j = \overline{1, n}; \quad (1)$$

- 6) Вектор $\bar{a} \in \mathbb{R}_+^n$, $\bar{a} = (a_1, \dots, a_n)$, где a_i – количество импортируемого товара на рынок извне. Предполагается, что хотя бы одно $a_i > 0$.

Определение. Моделью открытого рынка назовем набор параметров:

$$\sigma = (a, c_1, c_2, p^*, S^*, D^*, \mathcal{E}, \tilde{\mathcal{E}}).$$

Множество всех моделей открытого рынка обозначим через Σ .

Данный набор однозначно определяет функции спроса

$$D: P \rightarrow \mathbb{R}^n, D = (D_1, \dots, D_n),$$

и предложения

$$S: P \rightarrow \mathbb{R}^n, S = (S_1, \dots, S_n),$$

по формулам:

$$D_i(p_1, \dots, p_n) = D_i^* \prod_{j=1}^n (p_j^*)^{-E_{ij}} p_j^{E_{ij}}, i = \overline{1, n};$$

$$S_i(p_1, \dots, p_n) = S_i^* \prod_{j=1}^n (p_j^*)^{-\tilde{E}_{ij}} p_j^{\tilde{E}_{ij}}, i = \overline{1, n}.$$

Эти формулы получаются путем решения систем дифференциальных уравнений (1).

Определение. Положением равновесия, или вектором равновесных цен в модели σ назовем такой вектор $\bar{p} \in P$ такой, что

$$S(\bar{p}) + a = D(\bar{p}).$$

В [8] были получены следующие достаточные условия существования положения равновесия в этой модели. А именно, пусть

$$\bar{\alpha}(\sigma) = \left[\max_{i=\overline{1, n}} \left(S_i^* \prod_{j=1}^n (p_j^*)^{-\tilde{E}_{ij}} \min \{c_{1j}^{\tilde{E}_{ij}}, c_{2j}^{-\tilde{E}_{ij}}\} \right)^{-1} \sum_{k=1}^n \frac{c_{2k} - c_{1k}}{2} c_{2k} |\tilde{E}_{ki}^{-1}| \right]^{-1},$$

$$\bar{\beta}(\sigma) = \max_{i=\overline{1, n}} \left(D_i^* \prod_{j=1}^n (p_j^*)^{-E_{ij}} \max \{c_{2j}^{E_{ij}}, c_{1j}^{-E_{ij}}\} \right) \sum_{k=1}^n \frac{c_{2k} - c_{1k}}{2c_{1k}} |E_{ik}|,$$

$$\bar{\gamma}(\sigma) = \max_{i=\overline{1, n}} |S_i(\tilde{c}) + a_i - D_i(\tilde{c})|,$$

где \tilde{E}_{ki}^{-1} – элемент матрицы, обратной к \tilde{E} .

Теорема 1. Пусть параметры модели открытого рынка $\sigma \in \Sigma$ удовлетворяют условиям:

- $\bar{\beta}(\sigma) < \bar{\alpha}(\sigma)$;
- $\bar{\gamma}(\sigma) < \bar{\alpha}(\sigma) - \bar{\beta}(\sigma)$.

Тогда в модели σ существует вектор равновесных цен $\bar{p} \in P$.

Определение. Отображение $S: X \rightarrow Y$ называется α -накрывающим, если

$$S(B_X(x, r)) \supseteq B_Y(S(x), \alpha r) \forall x \in X, \forall r > 0.$$

Теорема 2. Предположим, что метрическое пространство X полно, заданы точка $x_0 \in X$ и числа $\alpha > 0, \beta > 0, R > 0$, причем $\alpha > \beta$, а точка x_0 является точкой совпадения отображений S и D , т.е. $S(x_0) = D(x_0)$. Пусть также имеет место:

1. для любого натурального N отображение S_N является α -накрывающим на $B_X(x_0, R)$ и замкнутым;
2. для любого натурального N отображение D_N удовлетворяет условию Липшица с константой β на множестве $B_X(x_0, R)$;

3. $\rho_Y(S_N(x_0), S(x_0)) \rightarrow 0, \rho_Y(D_N(x_0), D(x_0)) \rightarrow 0, n \rightarrow \infty.$

Тогда существует номер $\bar{N} > 0$ и последовательность $\{x_n\} \subset X$ такие, что

$$S_N(x_N) = D_N(x_N) \forall n > \bar{N}, \\ x_n \rightarrow x_0, n \rightarrow \infty.$$

Перейдем теперь к первому основному результату данной работы.

Определение. Будем говорить, что модель $\sigma^N = (a^N, c_1^N, c_2^N, p^{*N}, S^{*N}, D^{*N}, \varepsilon^N, \tilde{\varepsilon}^N) \in \Sigma$ сходится к модели $\sigma = (a, c_1, c_2, p^*, S^*, D^*, \varepsilon, \tilde{\varepsilon}) \in \Sigma$, если $a^N \rightarrow a, c_1^N \rightarrow c_1, c_2^N \rightarrow c_2, p^{*N} \rightarrow p^*, S^{*N} \rightarrow S^*, D^{*N} \rightarrow D^*, \varepsilon^N \rightarrow \varepsilon, \tilde{\varepsilon}^N \rightarrow \tilde{\varepsilon}.$

Теорема 3 (об устойчивости положения равновесия в модели открытого рынка). Пусть модель σ удовлетворяет всем условиям теоремы 1 и последовательность моделей $\{\sigma^N\} \subset \Sigma$ сходится к σ . Тогда для любого вектора равновесных цен $p \in P$ модели σ , удовлетворяющего неравенству $c_{j1} < p_j < c_{j2}$ для любого $j = \overline{1, n}$, существует натуральное число $\bar{N} > 0$ и последовательность $\{p^N\}_{N=\bar{N}}^\infty \subset \mathbb{R}_+^n$ такие, что:

1. при любом $N > \bar{N}$ вектор p^N является вектором равновесных цен модели σ^N ;
2. $p^N \rightarrow p$ при $N \rightarrow \infty$.

Доказательство. Доказательство этой теоремы опирается на применение теоремы 2. Сначала проведем вспомогательные построения. Для произвольного $\varepsilon > 0$ положим

$$v_1^\varepsilon = \tilde{c} - (1 - \varepsilon)(\tilde{c} - c_1), v_2^\varepsilon = \tilde{c} + (1 - \varepsilon)(c_2 - \tilde{c}), \\ M^\varepsilon = [v_{11}^\varepsilon, v_{21}^\varepsilon] \times \dots \times [v_{n1}^\varepsilon, v_{n2}^\varepsilon].$$

Очевидно, что для любого положительного $\varepsilon < 1$ справедливы $v_{j1}^\varepsilon < v_{j2}^\varepsilon, j = \overline{1, n}$ и включение $M^\varepsilon \subset P$.

Пусть $p \in P$ – вектор равновесных цен в модели σ , удовлетворяющий неравенству $c_{j1} < p_j < c_{j2}$ для любого $j = \overline{1, n}$. Тогда $p \in \text{int } M$, где $M \subset \mathbb{R}^n$ – шар ненулевого радиуса, и, следовательно, существует $\varepsilon_1 > 0$ такое, что $p \in \text{int } M^\varepsilon$ для любого положительного $\varepsilon > \varepsilon_1$.

Из предположений теоремы следует, что для любого $\varepsilon > 0$ существует номер $N_1(\varepsilon) > 0$ такой, что $M^\varepsilon \subset P^N$ для любого $N > N_1(\varepsilon)$.

В пространстве \mathbb{R}^n определим две нормы:

$$\|x\|_1 = 2 \max_{i,j=\overline{1,n}} \frac{|x_j|}{v_{j2}^\varepsilon - v_{j1}^\varepsilon} \forall x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n, \\ \|y\|_2 = \max_{i,j=\overline{1,n}} |y_i| \forall y = (y_1, \dots, y_n) \in \mathbb{R}^n.$$

Рассмотрим метрические пространства (X, ρ_X) и (Y, ρ_Y) , где метрики ρ_X, ρ_Y определяются нормами $\|\cdot\|_1$ и $\|\cdot\|_2$ соответственно.

Выберем произвольные положительные числа α и β такие, что $\bar{\beta}(\sigma) < \beta < \alpha < \bar{\alpha}(\sigma)$. В силу непрерывности функций $\bar{\beta}(\cdot), \bar{\alpha}(\cdot)$ существует положительное число $\varepsilon_2 < 1$ такое, что $\bar{\beta}(\mathcal{E}, \tilde{\mathcal{E}}, D^*, S^*, p^*, v_1^\varepsilon, v_2^\varepsilon, a) < \beta, \alpha < \bar{\alpha}(\mathcal{E}, \tilde{\mathcal{E}}, D^*, S^*, p^*, v_1^\varepsilon, v_2^\varepsilon, a)$ для любого $\varepsilon < \varepsilon_2$. Кроме того, для любого $\varepsilon > 0$ существует номер $N_2(\varepsilon) > 0$ такой, что $\bar{\beta}(\mathcal{E}^N, \tilde{\mathcal{E}}^N, D^{*N}, S^{*N}, p^{*N}, v_1^\varepsilon, v_2^\varepsilon, a^N) < \beta, \alpha < \bar{\alpha}(\mathcal{E}^N, \tilde{\mathcal{E}}^N, D^{*N}, S^{*N}, p^{*N}, v_1^\varepsilon, v_2^\varepsilon, a^N)$ для любого $N > N_2(\varepsilon)$. Положим $\varepsilon = 2^{-1} \min\{\varepsilon_1, \varepsilon_2\}, N_3 = \max\{N_1(\varepsilon), N_2(\varepsilon)\} + 1, X = \mathbb{R}_+^n, Y = \mathbb{R}^n$.

Пусть $S^N, D^N: X \rightarrow Y$ – функции спроса и предложения соответственно в модели $\sigma^N = (\mathcal{E}^N, \tilde{\mathcal{E}}^N, D^{*N}, S^{*N}, p^{*N}, v_1^\varepsilon, v_2^\varepsilon, a^N)$.

Повторяя рассуждения, проведенные при получении этих оценок получаем, что S^N при любом $N > N_3$ являются $\bar{\alpha}(\mathcal{E}^N, \tilde{\mathcal{E}}^N, D^{*N}, S^{*N}, p^{*N}, v_1^\varepsilon, v_2^\varepsilon, a^N)$ -накрывающими относительно M^ε и, следовательно, α -накрывающими относительно M^ε , а функции D^N при любом на множестве M^ε удовлетворяют условию Липшица с константой $\beta < \alpha$.

Выберем произвольное $R > 0$ такое, что $B_X(p, R) \subset M^\varepsilon$. Из формул [], [] следует, что $S^N(p) \rightarrow S(p), D^N(p) \rightarrow D(p)$ при $N \rightarrow \infty$. Следовательно, согласно теореме ?, существуют номер $\bar{N} > N_3$ и последовательность $\{p^N\} \subset B_X(p, R)$ такие, что $S^N(p^N) + a = D^N(p^N)$ и $p^N \rightarrow p$ при $N \rightarrow \infty$. Поскольку $p^N \in B_{X(p,R)} \subset M^\varepsilon \subset P^N = [c_{11}^N, c_{21}^N] \times \dots \times [c_{1n}^N, c_{2n}^N]$ для любого $N > \bar{N}$, то вектор p^N является вектором равновесных цен в модели σ^N .

Достаточные условия неединственности положения равновесия содержатся в следующей теореме.

Теорема 4. Пусть $\alpha < 2\beta, \exists \hat{p} \in \mathbb{R}_+^n: \hat{p} \neq \bar{p}, S(\hat{p}) + a = D(\bar{p})$.

Тогда для любых $p \in P$ таких, что $S(p) + a = D(\bar{p})$ и для любого $\varepsilon > 0$ существует точка $\xi \in P$ такая, что $\xi \neq \bar{p}, S(\xi) + a = D(\xi)$ и выполняется

$$\rho_X(\xi, \hat{p}) \leq \frac{\beta + \varepsilon}{\alpha - \beta} \rho_X(\bar{p}, \hat{p}), \rho_Y(S(\xi), S(\bar{p})) \leq \alpha \frac{\beta + \varepsilon}{\alpha - \beta} \rho_X(\bar{p}, \hat{p}).$$

Доказательство. Следует из теоремы 1 в [9].

Воспользуемся условиями этой теоремы, чтобы получить достаточные условия существования положения равновесия, отличного от найденного по теореме 1. Пусть требуется найти вектор равновесных цен \tilde{p} такой, что $S(\tilde{p}) + a = D(\tilde{p})$. Из этого равенства мы получаем систему уравнений:

$$S_i^* \prod_{j=1}^n (p_j^*)^{-\tilde{E}_{ij}} \tilde{p}_j^{\tilde{E}_{ij}} + a_i = D_i^* \prod_{j=1}^n (p_j^*)^{-E_{ij}} \tilde{p}_j^{E_{ij}}, i = \overline{1, n}.$$

Перенесем a_i слева направо в каждом уравнении, а затем поделим левую и правую части каждого уравнения этой системы на величины $S_i^* \prod_{j=1}^n (p_j^*)^{-\tilde{E}_{ij}}$, получим:

$$\prod_{j=1}^n (p_j^*)^{-\tilde{E}_{ij}} \tilde{p}_j^{\tilde{E}_{ij}} = -\frac{a_i}{S_i^*} + \frac{D_i^*}{S_i^*} \prod_{j=1}^n (p_j^*)^{-(E_{ij}-\tilde{E}_{ij})} \bar{p}_j^{\tilde{E}_{ij}}, i = \overline{1, n}.$$

Решение этой системы должно удовлетворять условию $\tilde{p} \in P$. Прологарифмировав эту систему, получим систему линейных относительно $\ln \tilde{p}_j$ уравнений и неравенств:

$$\sum_{j=1}^n \tilde{E}_{ij} \ln \tilde{p}_j = -\sum_{j=1}^n (E_{ij} - \tilde{E}_{ij}) \ln \frac{D_i^*}{S_i^*} \bar{p}_j = \omega_i, i = \overline{1, n}.$$

Библиографический список

1. Smith, A. An Inquiry into the Nature and Cause of the Wealth of Nations. 2 Vols. / A. Smith. – London, 1776.
2. Walras, L. Elements d'Economie Politique Pure / L. Walras. – Lausanne, 1874.
3. Arrow, K.J. Existence of an equilibrium for a competitive economy / K.J. Arrow, G. Debreu. – Econometrica, 1954, v.22, №3.
4. Арутюнов, А.В. Точки совпадения двух отображений / А.В. Арутюнов. – Функциональный анализ и его приложения, 2014. – Т. 48. – Вып. 1. – С.89-93.
5. Арутюнов, А.В. Существование обратных отображений и их свойства / А.В. Арутюнов, С.Е. Жуковский. – Труды МИАН, 2010. – т. 271. – С. 18-28.
6. Arutyunov, A.V. Equilibrium price as a coincidence point of two mappings / A.V. Arutyunov, S.E. Zhukovskiy, N.G. Pavlova. – Comput. Math. Math. Phys., 2013. – 53:2. – pp. 158-169.
7. Kotyukov, A.M. Equilibrium in Market Models / A.M. Kotyukov, N.G. Pavlova. – 14th International Conference Management of large-scale system development (MLSD), 2021. □– pp. 1–5.
8. Arutyunov, A.V. Equilibrium in Market Models with Known Elasticities / A.V. Arutyunov, A.M. Kotyukov, N.G. Pavlova. – Advances in Systems Science and Applications, 2022, – 21(4). – pp. 130–144.
9. Арутюнов, А.В. О структуре множества точек совпадения / А.В. Арутюнов, Б.Д. Гельман. – Матем. сб., 2015. – т. 206. – № 3. –с. 35–56.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ФАЗАМИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

А. Э. Лайко

Рассмотрены задачи поиска оптимально управления в расширении теоретико-игровых моделей «Центр-Агенты» и «Центр-Менеджер-Агенты», состоящем во введении зависимости результата действия агентов от его величины и эффективности управления, зависящей, в свою очередь от нагрузки на субъект управления. Найдены зависимости оптимальных параметров управления от числа работников организации. Для исследования отклика агентов на изменение параметров целевой функции в рамках дилеммы «Доход-Свободное время» предложен вид их функции полезности, сводящий анализ вариативности стратегий их поведения к анализу ее коэффициентов.

Ключевые слова: организационная система, управление, оптимизация структуры, тип агента, неопределенность деятельности агентов.

Неопределенность результатов деятельности работников организационных систем (ОС) является неотъемлемым их свойством. Она служит одним из источников их развития, однако при превышающем допустимого порога, она препятствует росту их эффективности. Изучение источников и закономерностей этой неопределенности позволяет превращать ее в объект организационного управления. Источники неопределенности сотрудника можно разделить на объективные, основанные на условиях его деятельности, и субъективные, связанные с его социально-психологическими и физиологическими особенностями. Субъективная неопределенность проявляется в неоднозначности влияния стимулирования на объем деятельности работника, а объективная – результатом его деятельности при постоянной активности.

В настоящей работе объективная неопределенность деятельности работника моделируется объемом деятельности менеджера, непосредственно направленной на работника. Этот объем, в свою очередь, определяется, как субъективной неопределенностью менеджера, так и объективной неопределенностью, связанной с вариативностью иерархической структуры ОС. Рассмотрены варианты двухуровневой и трехуровневой иерархической ОС.

Анализ субъективной неопределенности деятельности работников ОС связан с изучением стратегий поведения работников на рынке труда [4,5]. Предложен вид функции полезности, сводящий многообразие стратегий к

вариативности ее коэффициентов. Полученные результаты могут способствовать снижению неопределенности и росту ее эффективности.

1. Модель управления организационной системой

Рассмотрим следующее расширение двухуровневой модели ОС «Центр–Агенты» [6]. Доход Центра: $H(z) = \lambda z$, где z – продукт ОС, λ – цена единицы продукта. Результат деятельности ОС, состоящей из n агентов,

является функцией их действий y_i : $z = \sum_{i=1}^n y_i \cdot \beta_i$, где $0 \leq \beta_i \leq 1$ –

функциональный параметр, отражающий результативность управления i -м агентом, $\beta_i = \beta_i(w)$. Далее будем считать агентов одинаковыми, тогда $y_i = y_j$

$= y$, $\beta_i = \beta_j = \beta$, $i, j = 1, \dots, n$, $i \neq j$. В результате получим: $z = \sum_{i=1}^n z_i = n\tilde{z}$,

$\tilde{z} = \beta \cdot y$.

Пусть w – действие Центра по управлению каждым из агентов, a – коэффициент, характеризующий технологию управления. С учетом содержательного смысла функции $\beta(w, a)$ сформулируем ее свойства: $\beta(w, a)$ – монотонно возрастающая функция; $\beta(0, a) = 0$, $\lim_{w \rightarrow \infty} \beta(w, a) = 1$.

Далее будем считать, что $\beta(w, a) = \frac{aw}{1 + aw}$. Будем предполагать, что

функция затрат Центра на управление имеет вид: $s(w) = \phi(w) = W^\alpha$, $W = wn$, α – показатель нестабильности внешней среды ($0 \leq \alpha \leq 1$ – среда стабильна, $\alpha > 0$ – нестабильна). Далее везде в расчетах считаем $a = 1$ и $\alpha = 1$. Исследование зависимости оптимальной иерархии управления от этих параметров проведено в работе [6].

Будем считать, что в ОС существует нормативное значение $\beta_{\text{норм}} \in [0, 1]$ (например, $\beta_{\text{норм}} = 0.8$). В силу свойств $\beta(w, a)$ существует обратная функция $w_{\text{норм}}(a, \beta_{\text{норм}})$. Тогда $W_{\text{норм}} = nw_{\text{норм}}$ – совокупные нормативные затраты на управление агентами. При $\beta_{\text{норм}} = 0.8$ получим

$w_{\text{норм}} = \frac{\beta_{\text{норм}}}{1 - \beta_{\text{норм}}} = 4$ Будем считать, что Центр использует компенсаторную и

сдельную систему стимулирования. Будем также предполагать, что существуют предельные затраты Центра на управление $S_{\text{пред}} = W_{\text{пред}}^\alpha$, $W_{\text{пред}} = w\tilde{n}$ (\tilde{n} – предельное число подчиненных). Зависимость эффективности управления от нагрузки описывается формулой:

$$\beta(W_{\text{пред}}, n) = \frac{aW_{\text{пред}}/n}{1 + aW_{\text{пред}}/n}, \quad n \geq \tilde{n}.$$

Общую задачу управления ОС запишем в виде:

$$\begin{aligned}
F(\sigma, r, n) &= H(z) - \sum_{i=1}^n \sigma_i(z) - C(n) \rightarrow \max_{(\sigma, r, n)} \\
F_a &= \sigma_i(z_i) - C_i(y_i) \rightarrow \max_y \\
C_i &= \frac{y_i^\alpha}{r_i^{\alpha-1}} \\
C &= C_0 + Kn
\end{aligned} \tag{1}$$

2. Задача стимуляции числа агентов в двухуровневой и трехуровневой ОС

При использовании центром компенстароной системы стимулирования, можем переписать задачу (1) в следующем виде:

$$\begin{aligned}
F &= D(x, r) - C(x, r) = \\
&= \begin{cases} \lambda n y \frac{w_{\text{норм}}}{1 + w_{\text{норм}}} - n \frac{y^2}{2r_A} - (C_0 + Kn) \rightarrow \max_y, & n \leq \tilde{n}, \\ \lambda n y \frac{W_{\text{пред}}/n}{1 + W_{\text{пред}}/n} - n \frac{y^2}{2r_A} - (C_0 + Kn) \rightarrow \max_y, & n \geq \tilde{n}. \end{cases} \tag{2}
\end{aligned}$$

Решение задачи (2) имеет вид:

$$y^* = \frac{\lambda w_{\text{норм}} r_a}{1 + w_{\text{норм}}} \text{ при } n \geq \tilde{n}, \quad y^* = \frac{\lambda W_{\text{пред}} r_a}{W_{\text{пред}} + n} \text{ при } n \geq \tilde{n} \tag{3}$$

Теперь найдем оптимальное число агентов, решив следующую задачу. Для этого подставим в целевую функцию управление, найденное ранее (3).

$$F = \begin{cases} \lambda n y^* \frac{w_{\text{норм}}}{1 + w_{\text{норм}}} - n \frac{y^{*2}}{2r_a} - (C_0 + Kn) \rightarrow \max_n, & n \leq \tilde{n}, \\ \lambda n y^* \frac{W_{\text{пред}}/n}{1 + W_{\text{пред}}/n} - n \frac{y^{*2}}{2r_a} - (C_0 + Kn) \rightarrow \max_n, & n \geq \tilde{n}. \end{cases} \tag{4}$$

При докритическом количестве сотрудников функция $F^*(n)$ линейна, поэтому исследуем случай превышения нормативной нагрузки Центра:

$$F_2^* = n \left(\frac{\lambda^2 W_{\text{пред}}^2 r_a}{2(n + W_{\text{пред}})^2} - K \right) - C_0 \rightarrow \max_n, n \geq \tilde{n}. \tag{5}$$

Решение задачи (5) сводится к решению уравнения:

$$\lambda^2 W_{\text{пред}}^2 r_a (n + W_{\text{пред}}) - K \left(2(n + W_{\text{пред}})^3 \right) - 2n(\lambda^2 W_{\text{пред}}^2 r_a) = 0 \tag{6}$$

В зависимости от коэффициентов уравнения, решение задачи (6) может отвечать как предельному так и превышающему значению n .

Для определения оптимального числа сотрудников получаем следующую задачу оптимизации с векторным управлением (y, w)

$$F = \lambda n y \frac{aw}{1+aw} - n \frac{y^2}{2r_a} - \frac{w^2}{2r_m} - C(N) \rightarrow \max_{y, w}, \quad n \leq \tilde{n}_m. \quad (7)$$

Будем считать, что $a=1$, а $C(N)=K(n+1)$, тогда получим:

$$F = \lambda n \frac{\omega}{1+\omega} y - n \frac{y^2}{2r_a} - \frac{\omega^2}{2r_m} - K(n+1) \rightarrow \max_{y, w}, \quad n \leq \tilde{n}_m. \quad (8)$$

Решение задачи (7) имеет вид:

$$y^* = \lambda \frac{\sqrt[3]{r_a \lambda^2 r_m n} - 1}{\sqrt[3]{r_a \lambda^2 r_m n}} r_a \quad (9)$$

$$\omega^* = \sqrt[3]{r_a \lambda^2 r_m n} - 1 \quad (10)$$

Подставим решение (9),(10) в целевую функцию центра и получим значения максимальной прибыли центра.

$$F^*(y^*, \omega^*) = \left(\sqrt[3]{r_a \lambda^2 r_m n} - 1 \right)^2 \left(\frac{\lambda^2 n r_a}{2 \left(\sqrt[3]{r_a \lambda^2 r_m n} \right)^2} - \frac{1}{2r_m} \right) - K(n+1) \quad (11)$$

Управление менеджером позволяет косвенно регулировать качество работы подчиненных ему агентов и их число

Целевые функции работника

Представим, что аргументами функции полезности работника $u(D, \tau)$ служат доход и свободное время [4,5]. Ясно, что функция монотонно возрастает по обеим переменным, так как они являются благами, однако эти переменные не являются независимыми. Так как общее время (т. е. сутки) складываются из рабочего и свободного времени: $T = \tau_{\text{раб}} + \tau_{\text{св}}$.

В свою очередь рабочее время (или затраты) связано с доходом функцией стимулирования [1,2,3]. Простейшая функция стимулирования – повременная. Она имеет следующий вид: $\sigma(\tau_{\text{раб}}) = D(\tau_{\text{раб}}) = \delta \tau_{\text{раб}}$. Более сложная, сдельная функция стимулирования имеет вид: $\sigma(x) = D(x) = \delta x$, $x = (\tau_{\text{раб}}, r, w_m)$. Подставляя сдельную функцию стимулирования в функцию полезности сотрудника, получим ее целевую функцию в виде: $u(D, \tau) = u(\sigma(\tau_{\text{раб}})), T - \tau_{\text{раб}}); \quad u = u(\delta \tau_{\text{раб}}, T - \tau_{\text{раб}});$
 $u = u(\delta x(\tau_{\text{раб}}, r, w_m), T - \tau_{\text{раб}})$. Эта функция содержит в качестве аргумента рабочее время, являющееся стратегией работника [4,5]. Остальные переменные считаем параметрами. Максимизируя целевую функцию,

работник выбирает оптимальную стратегию – желаемое рабочее время:

$$\tau_{\text{опт}}^{\text{раб}} = \arg \max_{\tau_{\text{раб}}} (u(\sigma(\tau_{\text{раб}}), T - \tau_{\text{раб}})).$$

Рассмотрим основные целевые функции, определяющие тип агента [4, 5]. Основными целевыми функциями являются: его доход(I), затраты(II), прибыль(III) и эффективность(IV) [4].

Альтернативой рабочему времени выступает время свободное $\tau_{\text{св}} = T - \tau_{\text{раб}}$. Принимаем, что продолжительности рабочего дня не может превышать $T = 16$ часов.

Будем считать, что объем работы, выполняемый сотрудником за рабочее время определяется формулой: $\tau_{\text{раб}} = \frac{x^2}{2r}$ (12)

где x – это объем работы; а r – квалификация сотрудника.

Так как рабочее время имеет нижнюю и верхнюю границы, то объем работы также будет ограничен:

$$x \in [x_{\min}; x_{\max}] \quad (13)$$

где $x_{\min} = \sqrt{2r\tau_{\min}}$, $x_{\max} = \sqrt{2r\tau_{\max}}$.

Проанализируем выбор сотрудником оптимальной стратегии для различных целевых функций. Рассмотрим функцию (I) [1,4] при сдельной оплате труда:

$$D(x) = \delta x \quad (14)$$

Максимум данной функции достигается при

$$x^* = x_{\max} \Rightarrow \tau_{\text{раб}} = \tau_{\max} \quad (15)$$

Рассмотрим целевую функцию (II). Под затратами понимаем количество времени, затрачиваемого сотрудником на работу:

$$C(x) = c_{\text{затр}} \tau_{\text{раб}} + C_0 = \frac{x^2 c_{\text{затр}}}{2r} + C_0 \quad (16)$$

где $c_{\text{затр}}$ – константа нормировки.

При минимизации затрат оптимальным действием сотрудника будет:

$$x^* = x_{\min} \Rightarrow \tau_{\text{раб}} = \tau_{\min} \quad (17)$$

Рассмотрим целевую функцию (III):

$$P(x) = D(x) - C(x) = \delta x - \frac{x^2 C_{\text{затр}}}{2r} \quad (18)$$

При максимизации прибыли оптимальным действием сотрудника будет:

$$x^* = \begin{cases} x_{\min}, \frac{\delta r}{c_{\text{затр}}} < x_{\min} \\ x_{\max}, \frac{\delta r}{c_{\text{затр}}} > x_{\max} \\ \frac{\delta r}{c_{\text{затр}}}, \text{ иначе} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \tau_{\min}, \frac{\delta^2 r}{2c_{\text{затр}}r} < \tau_{\min} \\ \tau_{\max}, \frac{\delta^2 r}{2c_{\text{затр}}r} < \tau_{\max} \\ \frac{\delta^2 r}{2c_{\text{затр}}r}, \text{ иначе} \end{cases} \quad (19)$$

Рассмотрим целевую функцию (IV). Под эффективностью будем понимать отношение дохода к затратам.

$$\mathcal{E} = \frac{D}{C(x)} = \frac{\delta x}{C_0 + \frac{x^2 c_{\text{затр}}}{2r}} \quad (20)$$

При максимизации эффективности оптимальным действием сотрудника будет:

$$x^* = \begin{cases} x_{\min}, \sqrt{\frac{2C_0 r}{c_{\text{затр}}}} < x_{\min} \\ x_{\max}, \sqrt{\frac{2C_0 r}{c_{\text{затр}}}} > x_{\max} \\ \sqrt{\frac{2C_0 r}{c_{\text{затр}}}}, \text{ иначе} \end{cases} \Rightarrow \tau_{\text{раб}} = \begin{cases} \tau_{\min}, \frac{C_0 r}{c_{\text{затр}}} < \tau_{\min} \\ \tau_{\max}, \frac{C_0 r}{c_{\text{затр}}} > \tau_{\max} \\ \frac{C_0 r}{c_{\text{затр}}}, \text{ иначе} \end{cases} \quad (21)$$

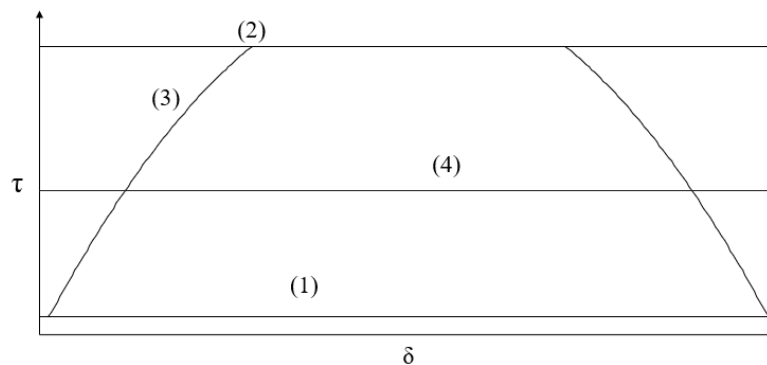


Рис. 1. Зависимость рабочего времени от нормы почасовой оплаты для различных целевых функций работника

Функция полезности работника ОС

В основу модели положим следующие соображения

Предпочтения агента (доход и свободное время) имеют иерархический характер. При росте иерархических уровней они чередуются, что проявляется как субгармонический характер функции полезности. До

достижения минимальной величины дохода ценность свободного времени близка к нулю, а переменная дохода, при этом, имеет неограниченный рост в то время, как переменная свободного времени ограничена [4,5]. Следовательно, монотонность дополняется свойством насыщаемости (или вогнутости) по переменной дохода и слабой насыщаемости (невыпуклости) по переменной свободного времени. Кроме того, отметим, что если использование свободного времени сопряжено с возможностью траты части дохода, то его ценность возрастает с ростом этой части, но это возрастание также насыщено [4]. При большом доходе оцутимость его роста нулевая, а к росту свободного времени – максимальна.

С учетом вышеизложенного, рассмотрим функцию полезности в следующем виде:

$$u(D, \tau) = \varphi_0(D) + \varphi_1(D)\tau \quad (22)$$

$$\varphi_i(D) = \frac{d_i \left(\frac{D}{\beta_i} \right)^{\gamma_i}}{1 + \left(\frac{D}{\beta_i} \right)^{\gamma_i}} \quad (23)$$

$$D = \delta \tau^p; \quad (24)$$

$$u(D, T - \tau_p) \longrightarrow \max_{\tau_p} \Rightarrow \tau_{opt}^p(\delta) \quad (25)$$

$$T = 16;$$

$$0 \leq \delta \leq 100$$

Для данной модели были получены некоторые варианты поведения функции полезности при различных начальных параметрах и систем стимулирования. Были получены возможные виды откликов агента на изменение системы стимулирования при фиксации начальных параметров.

Заключение

Рассмотрены простейшие модели субъективной и объективной неопределенности деятельности сотрудников ОС. Дальнейшее развитие этих моделей будет связано с включением их в модели механизации управления и вследствие этого – с повышением их эффективности. Положено начало, однако полное исследование зависимости вида кривых от используемых коэффициентов пока не завершено.

Библиографический список

1. А.А. Воронин, М.В. Губко, С.П. Мишин, Д.А. Новиков, Математические модели организаций: Учебное пособие. – М.: ЛЕНКНД, 2008. – 360 с.
2. В.Н. Бурков, В.В. Кондратьев, Механизмы функционирования организационных систем. – М.: ИПУ РАН, 2002
3. В.Н. Бурков, Д.А. Новиков, Теория активных систем: состояние и перспективы. – М.: Наука, 1981

4. Д.А. Новиков, С.А. Баркалов, С.С. Попов, Индивидуальные стратегии предложения труда: теория и практика, ИПУ РАН, Москва, 2002 – 110с.

5. Д.А. Новиков, Экспериментальное исследование индивидуальных стратегий предложения труда, - М.: Эгвес, 2010. – 104 с., ISBN 978-5-7262-0976-0.

6. Мишин, С. П. Динамическая задача синтеза оптимальной иерархической структуры / С.П. Мишин // Управление большими системами. — 2003. —Вып. 3. — С. 55–75.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАТТЕРНОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКТИВНОСТИ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МИМО-АГЕНТОВ

П.А. Нечаева, О.А. Волгина

Работа посвящена исследованию процессов распространения активности в социальных сетях на основе моделирования гетерогенных взаимодействий МИМО-агентов. В ходе исследования было проведено несколько серий экспериментов с различным количеством подсетей в сети и типами их взаимодействий. На основе полученных результатов были сделаны выводы о закономерностях процессов распространения активности в сети. Использование такого подхода позволяет моделировать распространение мнений пользователей социальных сетей и выявлять основные закономерности изменения их активности на основе созданной имитационной модели.

Ключевые слова: социальные сети, распространение активности, МИМО-агенты

Работа онлайн-социальных сетей в настоящее время в основном зависит от способности пользователей проявлять активность в этих сетях: добавление контента, коммуникация с другими пользователями. Исходя из этого, можно сделать вывод, что процесс, который осуществляется со временем множеством имеющихся пользователей в сети, порождает рост сети и как следствие ее выживание [1].

В настоящее время существует множество работ, посвященных исследованию индивидуального и коллективного поведения пользователей в социальных сетях. Авторы изучают эффективность распределения ресурсов в сетях, распространение информации о пользователях, предлагают различные способы классификации пользователей. Например, авторами работы [2] предлагается вероятностная модель активности пользователей, которая учитывает взаимодействие между пользователями путем введения связи между двумя стохастическими процессами.

Модель, рассматриваемая в настоящем исследовании, основана на описанной ранее модели гетерогенной сети МИМО-агентов [3]. Каждый агент такой сети обладает уникальным набором параметров, определяющих его поведение.

Сеть МИМО-агентов – это сеть, состоящая из агентов, которые имеют множество входов (Multiple Input), а также эти агенты способны генерировать информацию нескольких типов и подавать ее на множество выходов (Multiple Output). Динамика системы происходит в дискретном

времени t . В каждый момент времени, агент может генерировать информацию только одного типа. На рисунке 1 представлен пример сети, состоящей из двух ММО-агентов с внутренней структурой.

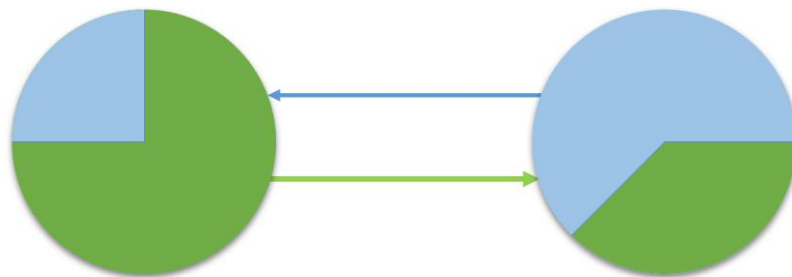


Рис. 1. Сеть ММО-агентов с внутренней структурой

Взаимодействие агентов между собой описывается системой $S = \langle N, C, R \rangle$, где N – множество узлов в сети, $C = \{c_1, \dots, c_m\}$ – все возможные типы активности в сети, $R \in R^{N \times N}$, $R = (r_{ij})$ – структурная матрица влияний.

Каждый агент обладает стохастическим вектором предпочтений $p_i = (p_{i1} \dots p_{im})$, $|p| = 1$. Пороговое значение Th_i описывает суммарное влияние соседей агента на него, при котором активируется агент.

В качестве основы для моделирования поведения сети были выбраны модели графов, обладающие частными свойствами социальных сетей: полный граф, модель графа Эрдеша-Реньи (далее ЭР), модель графа Барабаши-Альберт (далее БА) и модель графа Уоттса-Строгаца (далее УС). Представленные модели графов были выбраны с учетом необходимости проведения сравнительного анализа и учетом отражаемых ими феноменов реального мира.

Две сети с общими агентами. Пусть в сети состоящей из ММО-агентов есть две подсети. Каждая подсеть имеет свой тип активности в начальном состоянии. Назовем тип активности «зеленый» и «синий». Информация от одной сети передается другой посредством влияния одного агента из «влиятельной» сети, на влиятельного агента для второй подсети. Подсети состоят из равного количества агентов.

Входные параметры экспериментов: порог активации агентов сгенерирован согласно треугольному распределению; стохастические вектора предпочтений сгенерированы согласно бета-распределению; начальное состояние сгенерировано согласно дискретному равномерному распределению. Эксперимент выполнялся несколько раз при переменных стохастических векторах p .

На рис. 2б приведена реализация топологий двух сообществ на основе полного графа, в данном случае агент 0 и агент 7 объединяют две подсети, при чем агент 0 влияет на агента 7. График, приведенный на рис. 2а

описывает распределение типов активности агентов по долям в сети. Исходя из графика видно, что добавление одного агента с влиянием равным 1, не позволяет распространить тип активности агента по сети. Данного влияния недостаточно, чтобы превысить порог активации агента 7. При этом на агента 7 влияют его соседи и он активируется по превосходящему типу.

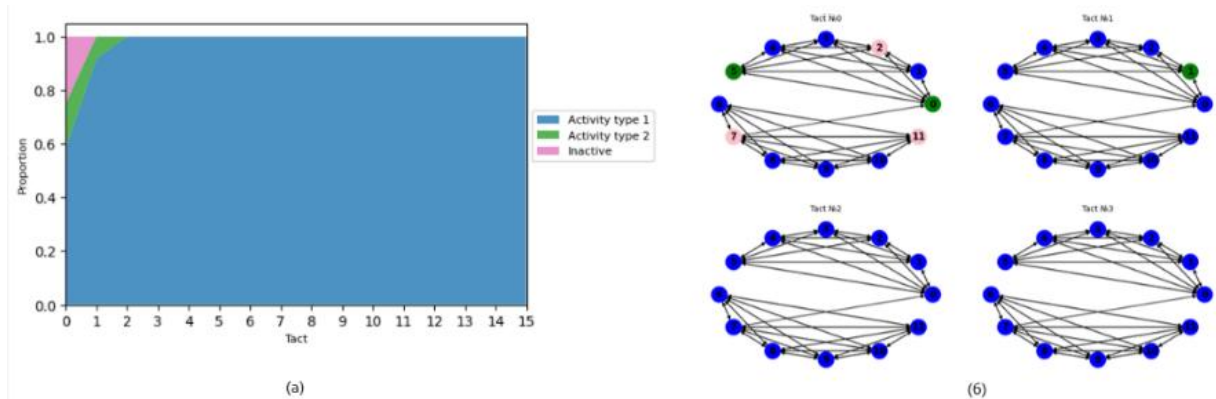


Рис. 2. Топология двух сообществ полного графа. а) распределение долей мнений, б) динамика сети в дискретном времени

Аналогичная ситуация происходит и с моделями ЭР, УС и БА, представленными на рисунке 3.

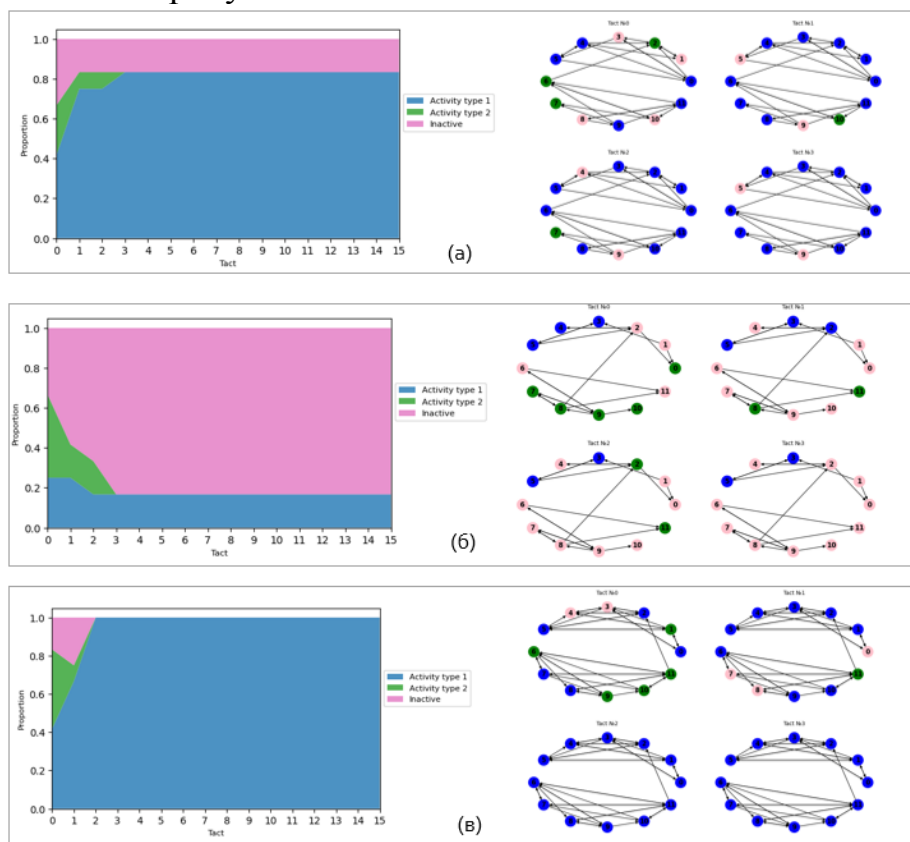


Рис. 3. Топология двух сообществ: а) модель ЭР, б) модель БА, в) модель УС

Для того, чтобы влиятельный агент сети смог передавать свою активность другой сети, необходимо подобрать значения показателя его влиятельности $r_{зс}$. Для экспериментального моделирования распределим начальные состояния сети по типам активности. Первая подсеть будет в начальном состоянии генерировать только синий тип, вторая подсеть только зеленый. Далее рассмотрим моделирование топологий двух сообществ на основе модели Барабаши-Альберт.

При случайном распределении долей, даже для сети состоящий из 20 агентов, повышения влияния не хватает для перераспределения типов активности. Динамика отражена на рисунке 4. Для каждого эксперимента повышалась сила влияния агента на его соседей. Обозначим силу влиятельного агента, как $r_{зс}$, то если влияние агента в начальном состоянии зеленого типа на агента, имеющего в начальном состоянии синий тип активности.

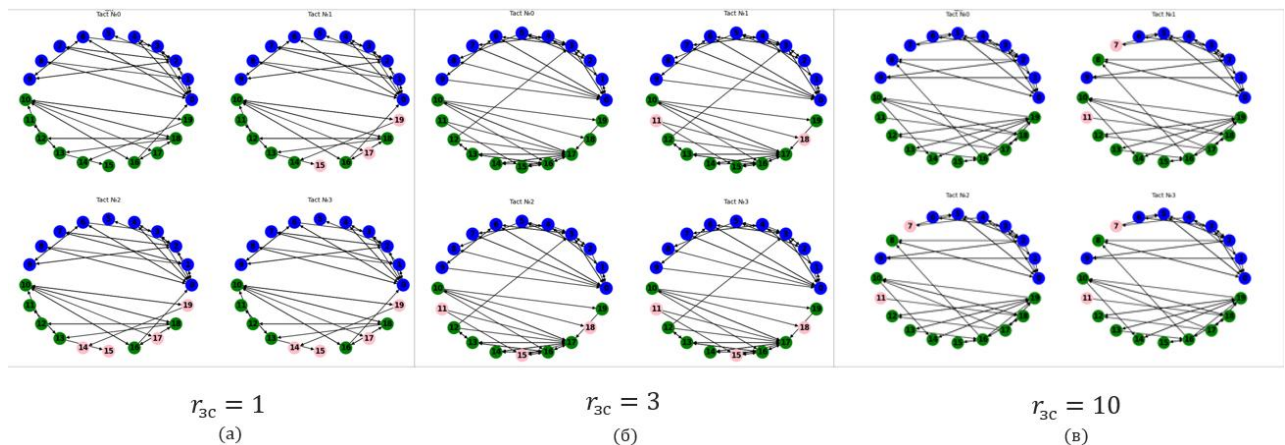


Рис. 4. Динамика сети при случайном распределении значений вектора предпочтений

Увеличим составляющую влияния агента $r_{зс}$. Моделирование проводилось на сетях, состоящих из 20, 30 и 40 агентов (рисунок 5). Из моделирования видно, что сила влияния влиятельного агента $r_{зс}=10$ достаточно только для 20 агентов. При этом информация из одной подсети передается другой подсети и распределяется по ней.

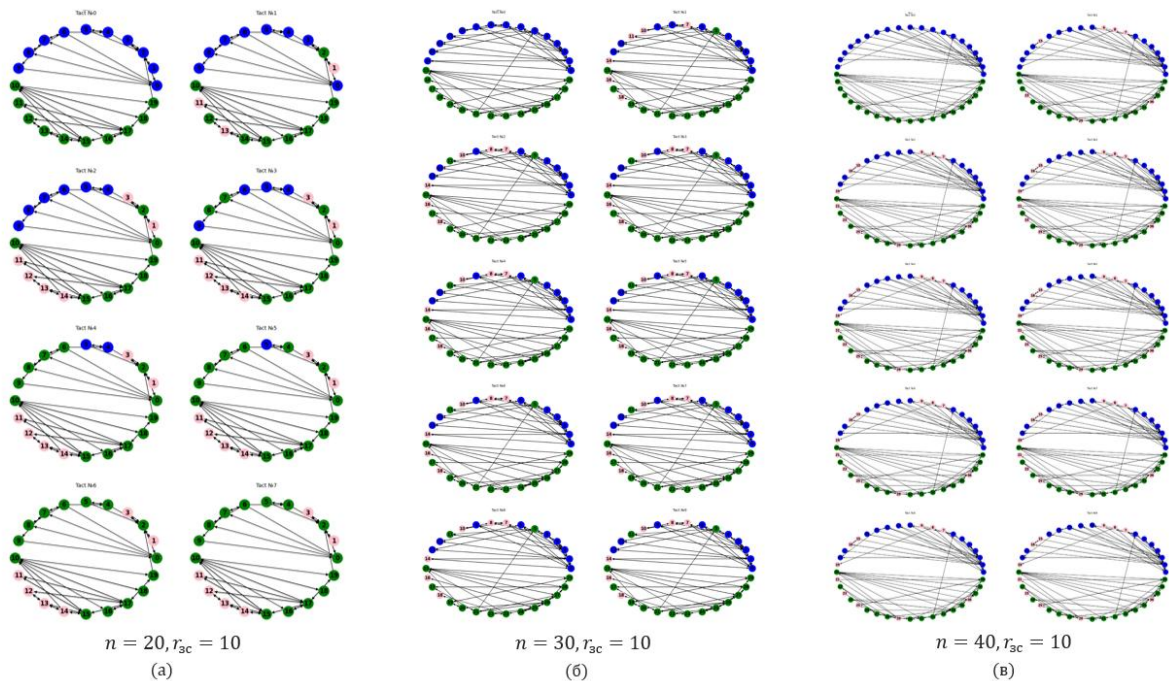


Рис. 5. Эксперименты с одним влиятельным агентом для сетей с 20, 30 и 40 агентами, стохастические вектора распределены случайно

Для достижения подобного эффекта в больших сетях необходимо увеличивать силу влияния. Это связано с тем, что адресат (принимающий агент), на которого приходится влияние со стороны зеленой подсети, также находится под влиянием соседей из его подсети. Чем больше на него приходится влияния со стороны синей подсети, тем больше должно компенсироваться влияние зеленого типа.

Достижения эффекта компенсации влияния синей подсети агента можно добиться несколькими способами. Первый способ – увеличение составляющей влияния адресанта (влиятельного агента) описан выше. Второй же способ заключается в увеличении количества влиятельных агентов. На рис. 6 представлено моделирование с двумя влиятельными агентами, оказывающих воздействие из зеленой подсети на синюю.

На рис. 6а показано, как осуществляется воздействие двух «зеленых» агентов, на агентов синей подсети, при силе влияния $r_{zc}=4$ для 30 агентов. Подобного воздействия хватает, чтобы передать зеленый тип активности синей подсети. Аналогично происходит и при 40 агентов в сети (рисунок 6б) при силе влияния $r_{zc}=6$.

Таким образом, можно сделать вывод, что большее количество агентов в подсети менее чувствительны к влиянию внешних агентов. Следовательно, для передачи информации необходимо либо увеличить силу воздействия, либо увеличить количество адресантов синего типа активности.

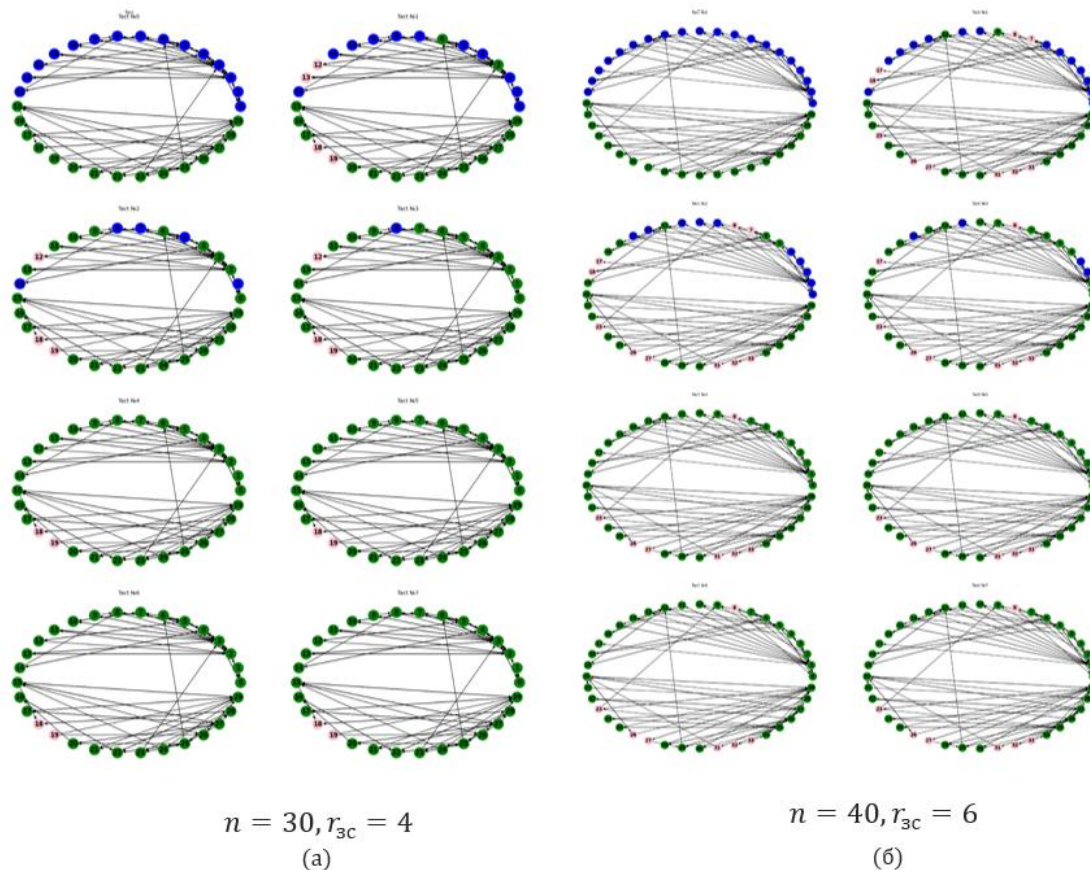


Рис. 6. Динамика сети при двух связующих агентах: а) для 30 агентов в сети, б) для 40 агентов в сети

Две сети со взаимным влиянием. Пусть существуют два сообщества в одной сети. Между данными сообществами существуют связующие агенты. Информация от одной подсети может передаваться в другую в обоюдном порядке.

Так же, как и в сериях экспериментов, описанных выше, в начальный момент времени, каждая подсеть имеет свой тип активности: зеленый и синий. Гипотеза данной серии моделирования заключается в возможности смены мнений в подсетях на противоположные.

При случайном распределении значений вектора мнений одна из подсетей переходит в состояние подсети с доминирующим влиянием. То есть, при совокупности факторов: уровня порогов и распределения связей в графе, подсеть с более влиятельным типом активности «заражает» менее «авторитетную» подсеть.

Таким образом, решением проблемы является распределение значений координат стохастических векторов r_i по долям. То есть «синяя» и «зеленая» подсети будут более восприимчивы к «зеленому» и «синему» типу активности соответственно. Однако, даже при таком распределении

векторов мнений, возникает эффект, описанный выше в экспериментах с двумя сетями с общими агентами – нехватка весовых составляющих влиятельных агентов. Для этого зададим влиятельным агентам бóльший вес составляющей влияния r_i . Полученные результаты отображены на рис. 7.

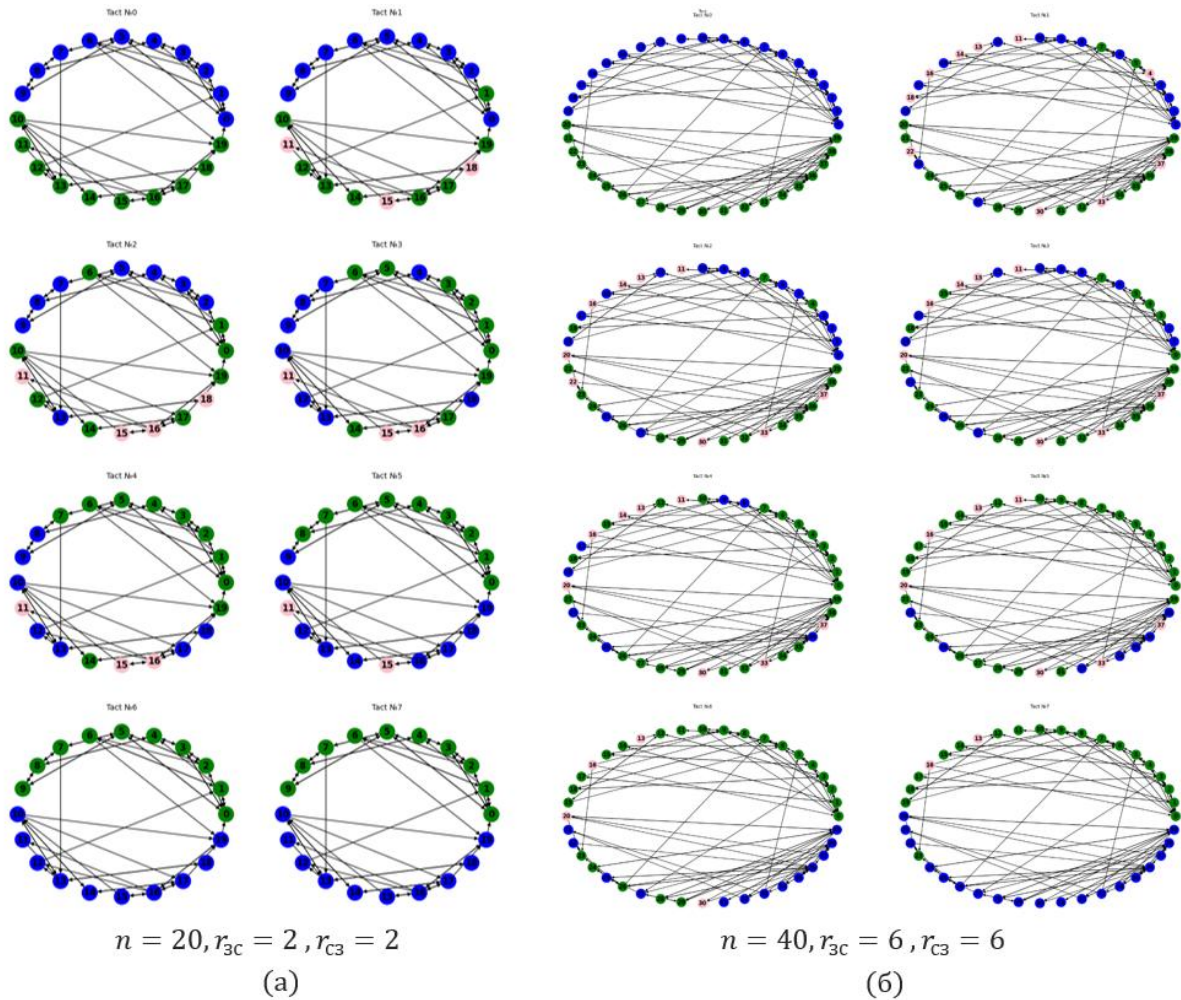


Рис. 7. Моделирование со взаимным влиянием подсетей для сетей с 20 и 40 агентами, стохастические вектора распределены по долям

Для сетей, состоящих из 20 агентов достаточно составляющей влияния равной 2: $r_{зс} = r_{сз} = 2$ (рисунок 7а). Для сетей из 40 агентов достаточно $r_{зс} = r_{сз} = 6$ (рисунок 7б).

Таким образом, при обратном распределении вектора мнений и увеличений весовой составляющей, гипотеза о возможности обмена информацией подтверждается.

Заключение. В ходе исследования было проведено несколько серий экспериментов с различным количеством сетей и типами их взаимодействий. На основе полученных результатов были сделаны выводы

о некоторых закономерностях процессов распространения активности в сети:

– для передачи одного типа влияния в подсеть с активной по другому типу влияния необходимо либо увеличить силу влияния связующего агента, либо увеличить количество таких агентов;

– при большом количестве связей в подсети, подсеть является менее чувствительной ко внешнему влиянию.

При обмене информацией между двумя подсетями, необходимо учитывать значения координат стохастического вектора мнений агентов.

Библиографический список

1. Pagani, M. The influence of personality on active and passive use of social networking sites. / M. Pagani, C.F. Hofacker, R. E. Goldsmith // *Psychology & Marketing*. – 2011. – Vol. 28, No 5. – P. 441–456.

2. Raghavan, V. Modeling temporal activity patterns in dynamic social networks / V. Raghavan, G. Ver Steeg, A. Galstyan, A. G. Tartakovsky // *IEEE Transactions on Computational Social Systems*. – 2014. – Vol. 1, No 1. – P. 89–107.

3. Zhilyakova, L.Yu. Modeling the Structure of MIMO-Agents and Their Interactions / L.Yu. Zhilyakova, S. Kuznetsov, A. Panov // *Artificial Intelligence. RCAI 2019. Communications in Computer and Information Science*. – 2019. – Vol. 1093. – P. 3–16.

УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ В МОДЕЛИ ВАЛЬРАСА-ЭВАНСА-САМУЭЛЬСОНА

С.О. Никаноров

Статья представляет результаты исследования динамической непрерывной модели Вальраса-Эванса-Самуэльсона для рынка двух товаров. Исследование проводится с использованием результатов теории накрывающих отображений. Представлены достаточные условия существования положения равновесия в данной модели. Исследован вопрос устойчивости положения равновесия в модели.

Ключевые слова: экономическое равновесие, функция спроса, функция предложения, накрывающее отображение, точки совпадения, устойчивость.

Рассмотрим экономическую модель, в которой существуют две группы участников: потребители и производители. Производители создают некоторый объем товаров, который затем приобретают потребители. Если предложение (т.е. объемы производства) становится меньше, чем потребление (т.е. спрос) – возникает дефицит. Дефицит неблагоприятно влияет на жизнь и благосостояние общества. С другой стороны, избыток товара (т.е. предложение больше, чем спрос) негативно отражается на производителе. При прежних затратах на производство производитель получает меньшую прибыль. Таким образом, мы можем понять, что для экономической системы необходимо, чтобы спрос на каждый товар был равен предложению. Такое состояние системы называется экономическим равновесием.

Современное развитие теории накрывающих отображений позволяет получить достаточные условия существования равновесия в случае, когда функции спроса и предложения являются нелинейными. Эти результаты основываются на теореме о точках совпадения α -накрывающего и β -липшицевого отображений.

В настоящей работе используются полученные ранее достаточные условия существования равновесия в модели «спрос-предложение», а именно константы накрывания и Липшица и их оценки. А также исследуются вопросы устойчивости и единственности положений равновесия для данной модели.

Рыночное равновесие – состояние, при котором ни у кого из экономических субъектов не возникает побуждений к его изменению. Применительно к спросу и предложению, точка равновесия будет находиться в точке пересечения кривых спроса и предложения.

Таким образом, мы можем видеть, что задача нахождения точки рыночного равновесия в динамической модели рынка сводится к решению уравнения

$$D(t, p, \dot{p}) = S(t, p, \dot{p}),$$

где $t \in [t_0; t_1]$, $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ – это цены на товары, $\dot{p} = (\dot{p}_1, \dot{p}_2, \dots, \dot{p}_n)$ – скорости изменения цен, D – отображение спроса, S – отображение предложения,

$$S(t, p, \dot{p}) : \mathbb{R} \times \mathbb{R}_+^2 \times \mathbb{R}_+^2 \rightarrow \mathbb{R}_+^2;$$

$$D(t, p, \dot{p}) : \mathbb{R} \times \mathbb{R}_+^2 \times \mathbb{R}_+^2 \rightarrow \mathbb{R}_+^2.$$

Рассмотрим модель Вальраса-Эванса-Самуэльсона рынка двух товаров [1]. Пусть заданы векторы

$$\mu = (\mu_1, \mu_2) \in \mathbb{R}_+^2, \lambda = (\lambda_1, \lambda_2) \in \mathbb{R}_+^2, f(I) = (f_1(I), f_2(I)) \in \mathbb{R}_+^2, p_0 = (p_{01}, p_{02}) \in \mathbb{R}_+^2, d_1 = (d_{11}, d_{12}) \in \mathbb{R}_+^2, d_2 = (d_{21}, d_{22}) \in \mathbb{R}_+^2,$$

причем $d_{i1} < d_{i2}, \forall i = 1, 2$, и векторы $v_1 = (v_{11}, v_{12}) \in \mathbb{R}_+^2, v_2 = (v_{21}, v_{22}) \in \mathbb{R}_+^2$. Также известно значение функций цены в начальной точке $p(t_0) = p_0$. Имеются естественные ограничения на время и цены:

$$t \in [t_0, t_1], \quad 0 < t_0 < t_1, \quad p_i(t) \in [d_{i1}, d_{i2}],$$

где t_0, t_1 – заранее заданные числа.

Под математической моделью рынка будем понимать набор, который описывает обобщенную модель Вальраса-Эванса-Самуэльсона:

$$\sigma = (\mu, \lambda, I, p_0, d_1, d_2, v_1, v_2, t_0, t_1) \in \mathbb{R}_+^2 \times \mathbb{R}_+^2 \times \mathbb{R}_+^2 \times \mathbb{R}_+^2 \times \mathbb{R}_+^2 \times \mathbb{R}_+^2 \times \mathbb{R}_+^2 \times \mathbb{R}_+^2 \times \mathbb{R} \times \mathbb{R},$$

где $\mu = (\mu_1, \mu_2)$ – объемы товаров, приобретаемых потребителем вне зависимости от бюджета, I – бюджет потребителя.

В рассматриваемой модели функция спроса имеет вид

$$D_i(p, \dot{p}) = f_i(I) \dot{p}_i p_i^{-1} + \mu_i, \quad i = 1, 2,$$

а функция предложения определяется как

$$S_i(t, p, \dot{p}) = \frac{t^{\lambda_i} p_i \dot{p}_i}{\prod p_j \dot{p}_j}, \quad i, j = 1, 2, j \neq i,$$

причем $d_{i1} = \min p_i, d_{i2} = \max p_i$ – соответственно минимальная и максимальная возможные цены единицы i -го товара для $i = 1, 2, d_{i1} < d_{i2}$; и скорость изменения цен товаров соответственно:

$$\dot{p}_i(t) \in [v_{i1}, v_{i2}],$$

для $i = 1, 2$.

Для получения достаточных условий существования положения равновесия и исследования вопроса устойчивости вектор-функции равновесных цен воспользуемся результатами теории накрывающих отображений.

Определение 1 [2]. Отображение $\psi : X \rightarrow Y$ называется α -накрывающим, если

$$B_Y(\psi(x), \alpha r) \subset \psi(B_X(x, r)) \text{ для } \forall x \in X, r \geq 0,$$

где X и Y – метрические пространства с метриками ρ_X и ρ_Y и $\alpha > 0$, $B_X(x, r)$ – замкнутый шар в полном пространстве X с центром в точке $x \in X$ и радиусом $r \geq 0$, а $B_Y(y, r)$ – замкнутый шар в пространстве Y с центром в точке $y \in Y$ радиуса $r \geq 0$.

Определение 2 [3]. Отображение $\psi : (X, \rho_X) \rightarrow (Y, \rho_Y)$ называется липшицевым, если

$$\rho_Y(\psi(x), \psi(x')) \leq \beta \rho_X(x, x') \text{ для } \forall x, x' \in X,$$

где $\beta \geq 0$ – константа Липшица.

Определение 3 [1]. Вектор-функция $p(t) \in P$ называется вектор-функцией равновесных цен в модели σ , если $D(t, p, \dot{p}) = S(t, p, \dot{p})$.

Перейдем к формулировке основных результатов. Положим

$$\frac{1}{\bar{\alpha}} = \max_{i=1,2} |f_i(I) d_{i2}^{-1}|$$

$$\bar{\beta} = \max_{i=1,2} \left| \frac{b^{\lambda_i} d_{i2}}{\prod_{i=1,2} d_{j1} \check{v}_{j1}} \right| + \left| \frac{b^{\lambda_i} \check{v}_{i2} d_{i2}}{\prod_{i=1,2} d_{j1} (\check{v}_{j1})^2} \right|$$

Теорема 1. Пусть существуют такие положительные числа $\nu, R_1, R_2, \sigma \in (0; t_1 - t_0]$, $\Omega \subseteq \mathbb{R}^2$ – заданное замкнутое множество и функция $\dot{x} \in L_{\{\infty\}}([t_0, t_1], \Omega)$, что:

1) для некоторого $\alpha > 0$ при п.в. $t \in [t_0, t_0 + \sigma]$ и любом $p \in B_{\mathbb{R}^n}(A_0, \nu)$ отображение $f(t, p, \cdot) : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^m$ является условно α -накрывающим относительно шаров $U(t) = B_{\Omega}(\dot{x}, R_1)$, $V(t, p) = B_{\mathbb{R}^m}(\psi(t, p, \dot{x}), \alpha R_2)$;

$$f(t, p, \dot{p}) = D(t, p, \dot{p}) - S(t, p, \dot{p}),$$

где $f(t, p, \dot{p})$ – α -накрывающее по \dot{p} , $D(t, p, \dot{p})$ – β -накрывающее по \dot{p} , $S(t, p, \dot{p})$ – γ -липшицево по \dot{p} и $\beta - \gamma = \alpha$,

2) при п.в. $t \in [t_0, t_0 + \sigma]$ и любом $x \in B_{\mathbb{R}^n}(A_0, \nu)$ выполнено включени

$$0 \in f(t, p, U(t));$$

3) существует такое $K \geq 0$, что при п.в. $t \in [t_0, t_0 + \sigma]$ для всех $p, \hat{p} \in B_{\mathbb{R}^n}(A_0, \nu)$ и любого $u \in U(t)$ выполнено неравенство

$$|f(t, p, u) - f(t, \hat{p}, u)| \leq K |p - \hat{p}|;$$

4) имеет место оценка

$$r_0 := \alpha^{-1} \text{vrai sup}_{t \in [t_0, t_0 + \sigma]} |f(t, A_0, \dot{x})| < R_{\min} = \min(R_1, R_2).$$

Тогда для любого $\epsilon > 0$ существует $\delta \in (0, \sigma]$ и соответствующее решение

$$p^\delta \in AC_\infty(A_0, [t_0, t_0 + \delta], \Omega)$$

задачи Коши, для которой выполнено неравенство

$$\rho_{L_\infty([t_0, t_0 + \delta], \Omega)}(p^\delta, \dot{x}^\delta) < r_0 + \epsilon,$$

где \dot{x}^δ – сужение функции \dot{x} на $[t_0, t_0 + \delta]$.

В силу теоремы 1 используя найденные константы были получены достаточные условия существования положения равновесия в данной модели.

Покажем теперь, что существующее в силу теоремы 1 положение равновесия устойчиво к малым возмущениям модели. А именно, пусть задана последовательность моделей $\{\sigma^N\}_{N=1}^\infty$, $\sigma^N = (\mu^N, \lambda^N, I^N, p_0^N, d_1^N, d_2^N, v_1^N, v_2^N, t_0, t_1)$ и модель $\sigma = (\mu, \lambda, I, p_0, d_1, d_2, v_1, v_2, t_0, t_1)$. Будем говорить, что последовательность моделей $\{\sigma^N\}_{N=1}^\infty$ сходится к модели σ , если при $N \rightarrow \infty$ имеет место

$$\mu^N \rightarrow \mu, \lambda^N \rightarrow \lambda, I^N \rightarrow I, p_0^N \rightarrow p_0, d_1^N \rightarrow d_1, d_2^N \rightarrow d_2, v_1^N \rightarrow v_1, v_2^N \rightarrow v_2.$$

Теорема 2. Допустим, что модель σ удовлетворяет условиям теоремы 1 и последовательность $\{\sigma^N\}$ сходится к σ . Тогда для любой вектор-функции равновесных цен $p(t) \in P$ модели σ , удовлетворяющего неравенству $d_{i1} < p_i(t) < d_{i2}$ для любого $j = 1, 2$, существуют натуральное число $\bar{N} > 0$ и последовательность $\{p^N(t)\}_{N=\bar{n}}^\infty \subset \mathbb{R}_+^2$ такие, что:

При любом $N > \bar{N}$ вектор-функция $p^N(t)$ является вектор-функцией равновесных цен в модели σ^N ;

$$p^N(t) \rightarrow p(t) \text{ при } N \rightarrow \infty.$$

Доказательство. Для доказательства теоремы 2 применим теорему 4 из [2]. Проведем вспомогательные построения. Для произвольного $\varepsilon > 0$ положим

$$k_1^\varepsilon = \tilde{d} - (1 - \varepsilon)(\tilde{d} - d_1), \quad k_2^\varepsilon = \tilde{d} - (1 - \varepsilon)(d_2 - \tilde{d}),$$

$$M^\varepsilon = [k_{11}^\varepsilon, k_{12}^\varepsilon] \times \dots \times [k_{n1}^\varepsilon, k_{n2}^\varepsilon].$$

Для любого положительного $\varepsilon < 1$ справедливо неравенство $k_{i1}^\varepsilon < k_{i1}^\varepsilon$, $i = 1, 2$, и включение $M^\varepsilon \in P$.

Пусть $p(t)$ – вектор-функция равновесных цен в модели σ и верно неравенство $d_{i1} < p_i(t) < d_{i2}$ для $i = 1, 2$. Тогда $p \in \text{int}M$ и, следовательно, существует $\varepsilon_1 > 0$ такое, что $p \in M^\varepsilon$ для любого положительного $\varepsilon < \varepsilon_1$.

Из предположений теоремы следует, что для любого $\varepsilon > 0$ существует номер $N_1(\varepsilon) > 0$ такой, что $M^\varepsilon \in P^N$ для любого $N > N_1(\varepsilon)$.

Выберем произвольные положительные α и β , такие, что $\bar{\beta}(\sigma) < \beta < \alpha < \bar{\alpha}(\sigma)$.

В силу непрерывности функций $\bar{\alpha}(\cdot)$, $\bar{\beta}(\cdot)$ существует положительное число $\varepsilon_2 < 1$ такое, что

$\bar{\beta}(\mu, \lambda, I, p_0, k_1^\varepsilon, k_2^\varepsilon, v_1, v_2, t_0, t_1) < \beta$, $\bar{\alpha}(\mu, \lambda, I, p_0, k_1^\varepsilon, k_2^\varepsilon, v_1, v_2, t_0, t_1) > \alpha$

для любого $\varepsilon < \varepsilon_2$. Кроме того, существует номер $N_2(\varepsilon) > 0$ такой, что

$$\bar{\beta}(\mu^N, \lambda^N, I^N, p_0^N, k_1^\varepsilon, k_2^\varepsilon, v_1^N, v_2^N, t_0, t_1) < \beta,$$

$$\bar{\alpha}(\mu^N, \lambda^N, I^N, p_0^N, k_1^\varepsilon, k_2^\varepsilon, v_1^N, v_2^N, t_0, t_1) > \alpha$$

для любого $N > N_2(\varepsilon)$.

Пусть $D^N, S^N : X \rightarrow Y$ – функции спроса и предложения соответственно в модели $\sigma^N = (\mu^N, \lambda^N, I^N, p_0^N, d_1^N, d_2^N, v_1^N, v_2^N, t_0, t_1)$. Отображения D^N при любом $N > N_3$ являются $\alpha(\mu^N, \lambda^N, I^N, p_0^N, d_1^N, d_2^N, v_1^N, v_2^N, t_0, t_1)$ -накрывающими относительно M^ε , а следовательно, и $\alpha(\mu, \lambda, I, p_0, d_1, d_2, v_1, v_2, t_0, t_1)$ -накрывающими относительно M^ε . Аналогично получаем, что отображения S^N на множестве M^ε удовлетворяют условию Липшица с константой $\beta < \alpha$.

Выберем произвольное $R > 0$ такое, что $B_X(p, R) \subset M^\varepsilon$. $S^N(p) \rightarrow S(p), D^N(p) \rightarrow D(p)$ при $N \rightarrow \infty$. Следовательно, согласно теореме 4 из [2], существуют номер $\bar{N} > N_3$ и последовательность $\{p^N(t)\} \subset B_X(p, R)$ такие, что $S^N(p^N(t)) = D^N(p^N(t))$ и $p^N(t) \rightarrow p(t)$ при $N \rightarrow \infty$.

Поскольку $p^N(t) \in B_X(p, R) \subset M^\varepsilon \subset P^N$ для любого $N > \bar{N}$, то вектор-функция $p^N(t)$ является вектором равновесных цен в модели σ^N , а следовательно вектор-функция $p(t)$ является вектор-функцией равновесных цен в модели σ .

Библиографический список

1. Арутюнов, А.В. Точки совпадения двух отображений / А.В. Арутюнов // Функциональный анализ и его приложения. – 2014. – Т. 48, № 1. – С. 89–93.
2. Арутюнов, А.В. Жуковский С.Е., Павлова Н.Г. Равновесные цены как точка совпадения двух отображений / А.В. Арутюнов, С.Е. Жуковский, Н.Г. Павлова // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2013. – Т. 53, № 2. – 225–237.
3. Аваков, Е.Р. Накрывающие отображения и их приложения к дифференциальным уравнениям, не разрешенным относительно производной / Е.Р. Аваков, А.В. Арутюнов, С.Е. Жуковский // Дифференциальные уравнения. – 2009. – Т. 45, № 5. – С. 613–634.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ РИСКОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕСТРУКТИВНОГО КОНТЕНТА В СОЦИАЛЬНОЙ СЕТИ «ВКОНТАКТЕ»

А.С. Рей

В настоящей работе предлагается использовать механизмы комплексного оценивания в качестве основы для алгоритма оценки рисков распространения деструктивного контента в социальной сети ВКонтакте, как инструмента противодействия распространению деструктивного контента. Алгоритм предполагается использовать на этапе, когда на уже опубликованный в группе, сообществе или на персональной странице контент поступает хотя бы одна жалоба от других пользователей сети.

Ключевые слова: деструктивный контент, распространение контента, социальные сети, оценка рисков, механизм комплексного оценивания.

Распространение деструктивного контента является основным инструментом информационного противоборства. Социальные сети могут усиливать распространение деструктивного контента из-за любопытства и доверчивости пользователей. Одной из проблем является высокая эмоциональная и когнитивная нагрузка на модераторов социальных сетей, так как жалобы обрабатываются вручную, а современные методы оценки контента проверяют сообщения независимо от уровня доверия и характеристик целевой аудитории. Для снижения этой нагрузки можно использовать вспомогательный алгоритм, отбирающий для модерации только контент с высоким риском распространения. В работе предлагается использовать разработанный алгоритм для оценки рисков распространения деструктивного контента через посты и комментарии к ним в группах и сообществах по интересам, в том числе и в постах на стене персональной страницы пользователя.

В многоэлементных системах целесообразно использовать механизм комплексного оценивания, где возможно получить агрегированную оценку всех показателей системы, то есть провести свертку [1, 2]. Для начала были отобраны критерии, детализирующие структуру задач предлагаемой системы комплексного оценивания риска распространения деструктивного контента за счет создания дерева критериев. На риск распространения влияют действия реагирования пользователей, свидетельствующие об их заинтересованности и способствующие распространению контента.

Значение риска распространения зависит от содержания контента согласно законодательству РФ.

Комплексным показателем (критерием) был выбран «уровень риска распространения деструктивного контента» (K), который будет определяться «уровнем популярности источника» (K1) и «уровнем ответственности за распространение» (K2). Критерии были отобраны таким образом, чтобы их значения на листьях дерева свертки можно было рассчитать автоматически с помощью VK API, машинным способом с помощью существующих классификаторов или методом сравнения по словарям.

Таким образом получаем бинарное дерево критериев, корневая вершина (уровень риска распространения деструктивного контента), которого, соединена двумя ребрами. Листьями дерева являются определенные факторы, влияющие на риск распространения деструктивного контента в социальной сети ВКонтакте. Остальные висячие вершины имеют по три ребра (рис. 1).



Рис. 1. Дерево критериев системы комплексного оценивания риска распространения деструктивного контента

Введем дискретную шкалу с агрегированными оценками для каждого показателя (табл. 1). Показатели дискретной шкалы критериев K11, K12, K121, K1222, K12211, K12212 были определены с учетом анализа средних показателей групп по интересам сети ВКонтакте за месяц апрель 2022 года.

Таблица 1

Дискретная шкала со значениями оценки для каждого показателя

Критерий	Характеристика критериев	Дискретная шкала	
К	Уровень риска распространения деструктивного контента	1	очень низкий уровень
		2	низкий уровень
		3	высокий уровень
		4	очень высокий уровень
К2	Уровень ответственности за распространение деструктивного контента	1	очень низкий уровень: распространение контента не ведет к уголовной и/ или административной ответственности
		2	низкий уровень
		3	средний уровень
		4	распространение контента ведет к административной и/ или уголовной ответственности
К21	Возраст получателей	1	18+ лет
		2	16–18 лет
		3	12–16 лет
		4	6–12 лет
		5	0–6 лет
К22	Уровень деструктивности	1	допустимо к распространению среди всей возрастной категории
		2	допустимо к распространению с возраста 6+
		3	допустимо к распространению с возраста 12+
		4	допустимо к распространению с возраста 16+
		5	допустимо к распространению среди 18+
		6	запрещено к распространению
К1	Уровень популярности источника	1	очень низкий уровень
		2	низкий уровень
		3	высокий уровень
		4	очень высокий уровень
К11	Количество постов в месяц	1	≤ 10
		2	10–50
		3	50–100
		4	≥ 100
К12	Уровень охвата постав	1	очень низкий уровень (≤ 100)
		2	низкий уровень (100–1 000)
		3	высокий уровень (1 000–15 000)
		4	очень высокий уровень ($>15 000$)
К121	Количество просмотров	1	$\leq 1 000$
		2	1 000–500 000
		3	500 000–1 000 000
		4	$\geq 1 000 000$
К122	Уровень вовлеченности	1	очень низкий уровень
		2	низкий уровень

Продолжение таблицы 1

		3	высокий уровень
		4	очень высокий уровень
K1221	Уровень привлекательности постов	1	очень низкий уровень
		2	низкий уровень
		3	высокий уровень
		4	очень высокий уровень
K1222	Количество репостов	1	≤ 50
		2	50–100
		3	100–500
		4	≥ 500
K12211	Количество лайков	1	≤ 100
		2	100–500
		3	500–1 000к
		4	$\geq 1 000$
K12212	Количество комментариев	1	≤ 50
		2	50–100
		3	100–500
		4	≥ 500

Для получения значений промежуточных критериев были построены матрицы свертки, где по осям матрицы представлены значения критериев нижестоящих по иерархии смежных узлов, а ячейки матрицы содержат оценки по агрегированному критерию, то есть значения критериев более высокого уровня (рис. 2).

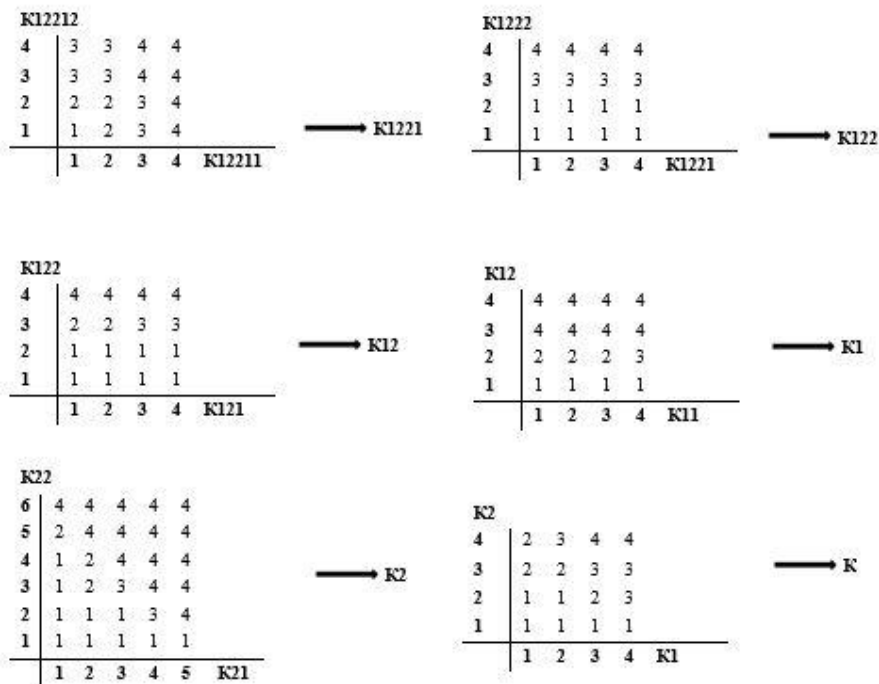


Рис. 2. Матрицы свертки для оценки критериев

Описанный выше механизм комплексного оценивания можно использовать в качестве основы алгоритма оценки рисков распространения деструктивного контента как инструмент противодействия распространению контента. Разработанный алгоритм предполагается встроить в систему оценки рисков распространения деструктивного контента (ARAS) в социальной сети ВКонтакте. Данный алгоритм предполагается использовать после получения хотя бы одной жалобы на контент и перед отправкой на модерацию, чтобы оценить риск распространения контента и приоритизировать поступающие жалобы.

Система включает в себя 4 модуля: сама система оценки рисков распространения деструктивного контента, модуль контент-анализа, модуль базы-данных ВКонтакте, модуль принятия решений. При поступлении жалобы в систему ARAS вводится идентификатор источника и сам контент. Обнаружение деструктивного контента осуществляется в модуле контент-анализа. Количественные показатели получают с помощью методов VK API из БД. В самой системе высчитывается итоговая оценка уровня риска распространения деструктивного контента. После получения оценки результат отправляется в модуль принятия решений. Если итоговое значение больше или равно трем, то осуществляется временная блокировка, а контент направляется на модерацию. Если итоговая оценка меньше или равна двум, то контент доставляется получателю (рис. 3).

Чтобы верифицировать систему ARAS была использована готовая база данных постов и комментариев, собранная в рамках другого исследования [3] из групп на тематику Севера России. На основе этих данных модели осуществляли предсказания, является ли контент деструктивным. Была взята готовая модель, работающая по следующему принципу: текст каждого комментария разбивается на отдельные слова, после чего происходит лемматизация с помощью инструментов библиотеки NLTK [4]. В результате каждый комментарий преобразуется в список слов. После этого удаляются стоп-слова: все слова из одной буквы, а также стоп-слова из списка библиотеки NLTK и списка библиотеки Wordcloud. Текста делились по следующему категориям: toxic - обычный токсичный, severe toxic - сильно токсичный, obscene непристойный, threat - содержащий угрозу, insult – оскорбительный, identity hate - содержащий ненависть к личности.

С помощью API VK, зная id источника, были получены метаданные, необходимые для проверки алгоритма комплексной оценки на эффективность: количество лайков, количество репостов, количество комментариев, количество просмотров. Для верификации предложенного алгоритма была сформирована выборка из ста единиц контента, экспертно

классифицированного как деструктивный (P) и нейтральный (N). Количество единиц контента обоих классов в выборке было одинаковым.

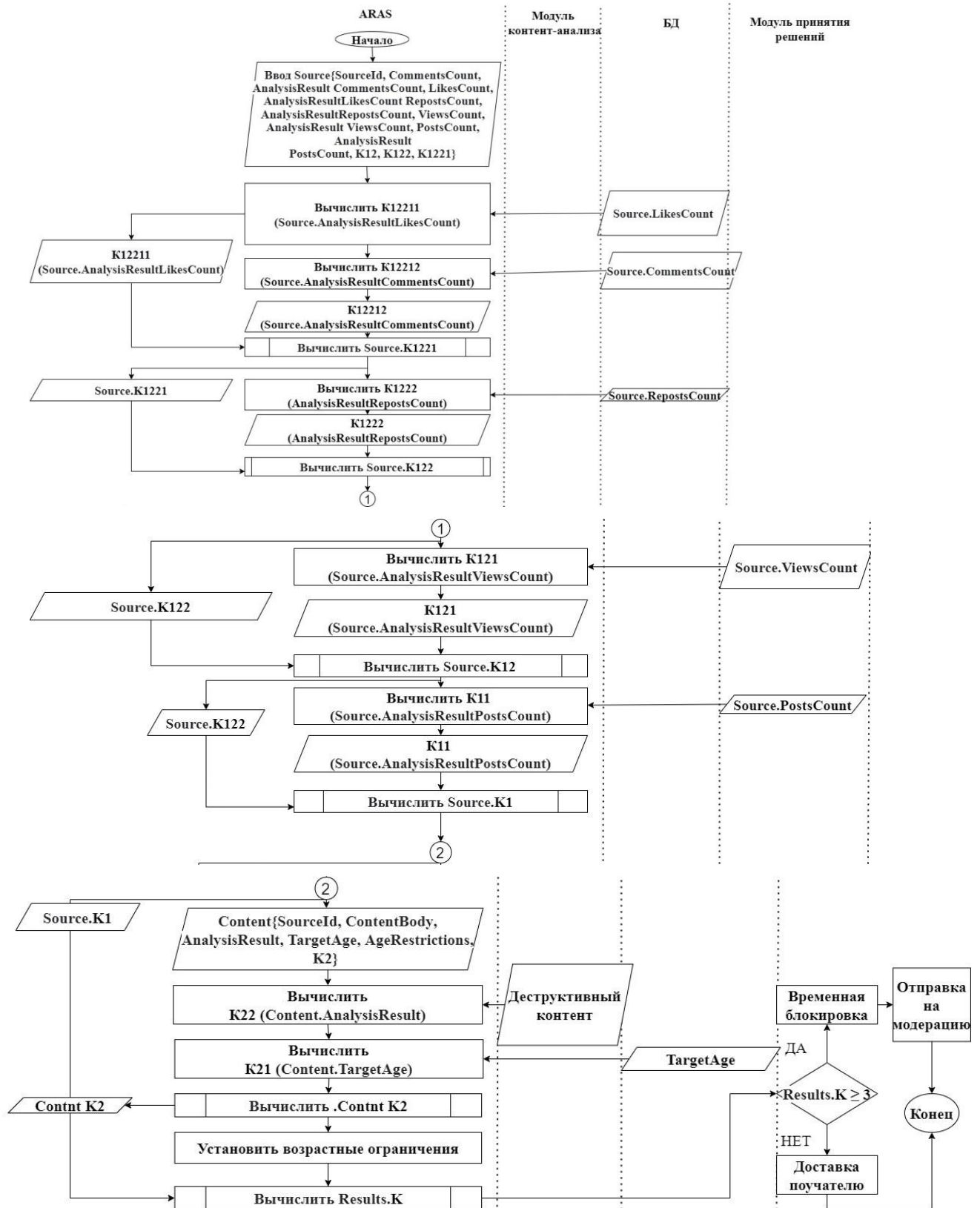


Рис. 3. Блок-схема алгоритма ARAS

Затем данный контент был подвергнут оценке с помощью предложенного алгоритма. Из 50 случаев контента, классифицированного экспертами как деструктивный, в 46 случаях значение критерия К «оценка уровня риска распространения деструктивного контента» составила 3 или выше (TP), что соответствует высокому уровню риска, в 4 случаях алгоритм выдал ложновысокие значение показателя К (FP), в 4 случаях — значения 2 или ниже (FN).

Среди 50 случаев контента, классифицированного экспертами как нейтральный (N), в 36 случае значение критерия К «оценка уровня риска распространения деструктивного контента» не превосходила 2 (TN), что соответствует низкому уровню риска (рис. 4).

		Actual values	
		Positive (1)	Negative (0)
Predicated values	Positive (1)	46	14
	Negative (0)	4	36

Рис. 4. Матрица ошибок

Аккуратность алгоритма показывает долю правильных ответов алгоритма:

$$accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} = 0,82, \quad (1)$$

где TP — количество верно идентифицированного с помощью ARAS единиц деструктивного контента, TN — количество верно идентифицированного с помощью ARAS нейтрального контента, FP — количество деструктивного контента, ошибочно определенного ARAS как нейтрального, FN — количество нейтрального контента, ошибочно определенного ARAS как деструктивного.

Точность алгоритма показывает долю объектов, действительно принадлежащих данному классу относительно всех объектов, которые система отнесла к этому классу:

$$precision = \frac{TP}{TP+FP} = 0,77. \quad (2)$$

Чувствительность алгоритма – это доля верно классифицированных положительных (деструктивный контент) примеров от общего числа, т. е.

показывает способность правильно оценивать риск распространения деструктивного контента:

$$TPR = \frac{TP}{P} = \frac{TP}{TP+FN} = 0,92. \quad (3)$$

Специфичность алгоритма показывает способность отвергать заболевание, констатировать его отсутствие там, где его действительно нет. В нашем случае это способность алгоритма выявлять контент с низким уровнем риска распространения в случаях, где уровень действительно низкий, тем самым снижая нагрузку на модератора. Специфичность определяется по следующей формуле:

$$TNR = \frac{TN}{N} = \frac{TN}{TN+FP} = 0,72. \quad (4)$$

Заключение. Чувствительность алгоритма ARAS с предложенной конфигурацией дерева оценивания и матрицами сверток превышает 0,82.

Это позволяет считать разработанный алгоритм в первом приближении подходящим для использования в качестве инструмента экспресс-оценки риска распространения деструктивного контента.

Для обработки большого потока входящего контента требуется повысить специфичность хотя бы до 0,8, для чего, предположительно, достаточно будет провести тонкую настройку алгоритма путем корректировки матриц свертки.

Направления совершенствования исследований заключается в использовании методы машинного обучения вместо экспертных оценок для обработки деструктивного контента и точной настройки критериев.

Библиографический список

1. Новиков, Д.А. Теория управления организационными системами / Д.А. Новиков. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2012. – 604 с.
2. Вронский, К.А. Методы автоматизированного сбора информации с социальной сети «Вконтакте» / К.А. Вронский, Е.А. Шеленок // Информационные технологии XXI века: Сборник научных трудов. – 2021. – С. 389–393.
3. Гордеев Д.И. Специфика Интернет-Коммуникации В Социальных Сетях Сообществ Севера России / Д.И. Гордеев, Д.В. Филиппов, А.И Рей // Речевая коммуникация в сетевых структурах: между глобальным и локальным. – 2022. – С. 241–255.
4. Natural Language Toolkit [Электронный ресурс] [nltk.org](https://www.nltk.org), 2022 – Дата обновления: 25.03.2022. – URL: <https://www.nltk.org/index.html> (дата обращения: 11.08.2022).

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ ОРГАНИЗАЦИИ НАУЧНОЙ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СФЕР С УЧЕТОМ СПЕЦИФИКИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ

И.Е. Селезнева, В.В. Клочков

Рассмотрена подготовка студентов по фондоемкому и низкофондоемкому научным направлениям: аэрофизика и экономика. Оценены затраты на подготовку студентов по этим направлениям в зависимости от количества студентов, которых необходимо подготовить, и от структуры организации научной и образовательной сфер в стране: когда наука интегрирована в образовательные учреждения – система исследовательских университетов – вертикально-интегрированная структура, и когда углубленная подготовка студентов отдается вузами на аутсорсинг национальным лабораториям, в которых сконцентрирована наука – сетевая структура. Проведены параметрические расчеты для нескольких характерных значений количества вузов и национальных лабораторий в сетевой структуре, и для нескольких характерных значений количества научно-исследовательских университетов при вертикально-интегрированной структуре науки и образования. Определены условия, когда сетевая структура организации науки и образования будет экономически эффективнее.

Ключевые слова: структура организации науки и образования, объем экспериментальной базы, критическая масса ученых, ученые-преподаватели, исследовательские университеты, национальные лаборатории.

В работе оцениваются минимально необходимые затраты на развитие науки и обучение студентов по отдельным научно-техническим направлениям. Рассматривается подготовка студентов в случае вертикально-интегрированной структуры организации научной и образовательной сфер – системе исследовательских университетов, и в случае сетевой организации научной и образовательной сфер – системе «аутсорсинговых» вузов, делегирующих углубленную подготовку студентов национальным лабораториям. Предполагается наличие минимально возможного (для развития данного научного направления) объема экспериментальной базы и минимальной «критической массы» ученых в отдельном научно-исследовательском университете или национальной лаборатории. Также предполагается выполнение следующих ограничений (подробнее см. [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]):

1) при вертикальной организации научной и образовательной сфер

$$r = \alpha_1 p_1, r = \alpha_2 p_2, p_2 = \beta u, u \geq u_{\text{крит}};$$

2) при сетевой организации научной и образовательной сфер

$$r = \alpha_1 p_1, \alpha_2 = \frac{lr}{mp_2}, p_2 = \beta u, u \geq u_{\text{крит}};$$

где r – количество студентов, обучающихся по отдельному научно-техническому направлению в рамках одного вуза (университета); α_1 – максимально допустимое количество студентов, обучающихся по отдельному научному направлению, приходящееся на одного «чистого» преподавателя (преподающего фундаментальные дисциплины); p_1 – количество «чистых» преподавателей, готовящих специалистов по отдельному научному направлению в рамках одного вуза (университета); α_2 – максимально допустимое количество студентов, обучающихся по отдельному научному направлению, приходящееся на одного преподавателя-ученого, который читает авторские спецкурсы и ведет научное руководство; p_2 – количество ученых-преподавателей, готовящих специалистов по отдельному научному направлению в рамках одного университета или национальной лаборатории; β – максимально возможное отношение количества «ученых-преподавателей» к общему количеству ученых, работающих по отдельному научному направлению в рамках одного университета или национальной лаборатории; u – общее количество ученых, работающих по отдельному научному направлению в рамках одного университета или национальной лаборатории; $u_{\text{крит}}$ – «критическая масса» ученых, работающих по отдельному научному направлению в рамках одного университета или национальной лаборатории; l – количество вузов (университетов), готовящих специалистов по отдельному научно-техническому направлению; m – число национальных лабораторий по отдельному научному направлению в стране.

Оценка затрат на подготовку студентов проводилась по следующим формулам (1), (2), подробнее см. [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$C^{\text{верт}} = l \cdot [r \cdot c_{cm} + p_1 \cdot c_1 + p_2 \cdot c_2 + u \cdot c_u + C_{\text{ЭБ}}]; \quad (1)$$

$$C^{\text{сет}} = l \cdot (r \cdot c_{cm} + p_1 \cdot c_1) + m \cdot (p_2 \cdot c_2 + u \cdot c_u + C_{\text{ЭБ}}), \quad (2)$$

где $C^{\text{верт}}$ – затраты на подготовку студентов в рамках вертикально-интегрированной структуры; $C^{\text{сет}}$ – затраты на подготовку студентов в рамках сетевой структуры; c_{cm} – стоимость годового обучения студента по отдельному научному направлению (не включая заработную плату преподавателей и пользование экспериментальной базой); c_1 – заработная плата одного преподавателя фундаментальных и общеобразовательных

дисциплин, готовящего специалистов по отдельному научному направлению (в расчете на полную занятость); c_2 – заработная плата ученого-преподавателя, готовящих специалистов по отдельному научному направлению (в расчете на полную занятость); c_u – заработная плата ученого, работающего по отдельному научному направлению; $C_{ЭБ}$ – затраты на содержание экспериментальной базы по отдельному научному направлению в рамках одного университета или национальной лаборатории.

Оценка затрат на подготовку студентов по научно-техническому направлению «аэрофизика». Для обучения студентов по направлению «аэрофизика» необходима дорогостоящая экспериментальная база, включающая в себя комплекс аэродинамических труб, комплекс пилотажных и испытательных стендов см. [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Для проведения параметрических расчетов, по направлению аэрофизика, были использованы следующие исходные данные: $u_{крит} = 20$ (см. [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]), $\beta = 0,6$ (см. [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]), $\alpha_1 = 25$, $\alpha_2 = 3$, $c_u = 0,84$ млн.руб./год – заработная плата ученого. $c_2 = 0,3$ млн.руб./год – заработная плата ученого-преподавателя (с учетом работы в вузе на четверть ставки); $c_1 = 0,6$ млн.руб./год – заработная плата «чистого» преподавателя; $c_{ст} = 0,4$ млн.руб./год – стоимость годового обучения студента; $C_{ЭБ} = 1600$ млн.руб. – объем экспериментальной базы, см. [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]; $t = 50$ лет – срок эксплуатации экспериментальной базы. Рассмотрено два значения количества национальных лабораторий: $m = 1$, $m = 2$; три значения количества университетов (вузов): $l = 1$, $l = 3$, $l = 15$.

На рис. 1–3 представлена зависимость затрат на обучение студентов по направлению подготовки аэрофизика в зависимости от количества студентов, которых решено подготовить по данному научному направлению, при разной структуре системы организации образования и науки.

Наименьшие затраты для подготовки студентов по рассмотренному фондоемкому научному направлению получаются при сетевой организации научной и образовательной сфер, при количестве национальных лабораторий равном 1, или при вертикальной организации при количестве исследовательских университетов равном 1. Тем не менее, по разным соображениям может потребоваться наличие нескольких вузов (для диверсификации системы образования, развития регионов и т.п.). Что касается национальных лабораторий, как правило, их количество по каждому научному направлению в стране невелико, и в самом деле редко превышает 1-2. Можно заметить, что наибольшая экономия при сетевой

организации науки и образования (по сравнению с системой вертикально-интегрированных исследовательских университетов) получится для малого числа студентов. Т.е. сетевая организация наиболее эффективна при подготовке малочисленных высококвалифицированных специалистов по «прорывным» направлениям научно-технологического развития.

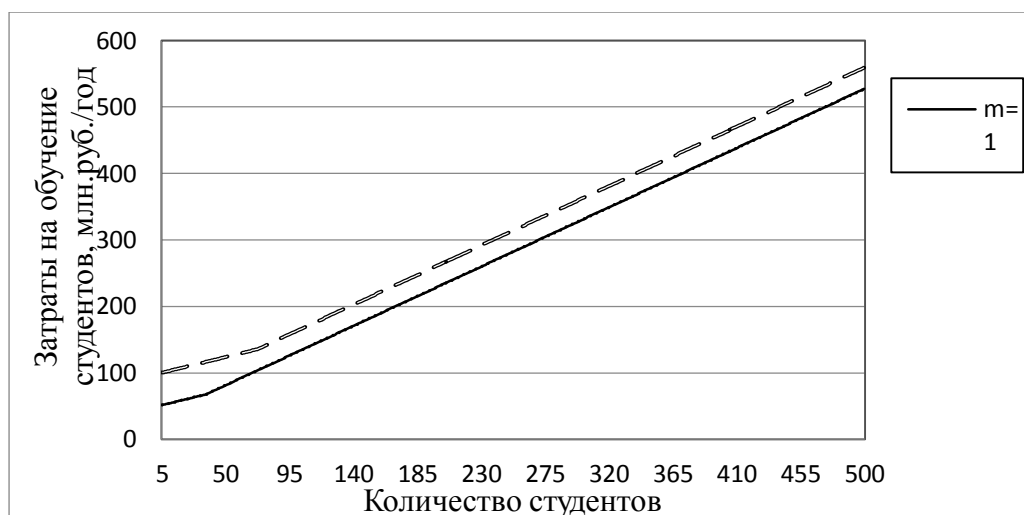


Рис. 1. Зависимость затрат на науку и образование по фондоемкому направлению от общего числа студентов, которых необходимо подготовить по данному научному направлению, при сетевой структуре с 1 вузом с 1 или 2 национальными лабораториями и при вертикально-интегрированной структуре с 1 исследовательским университетом

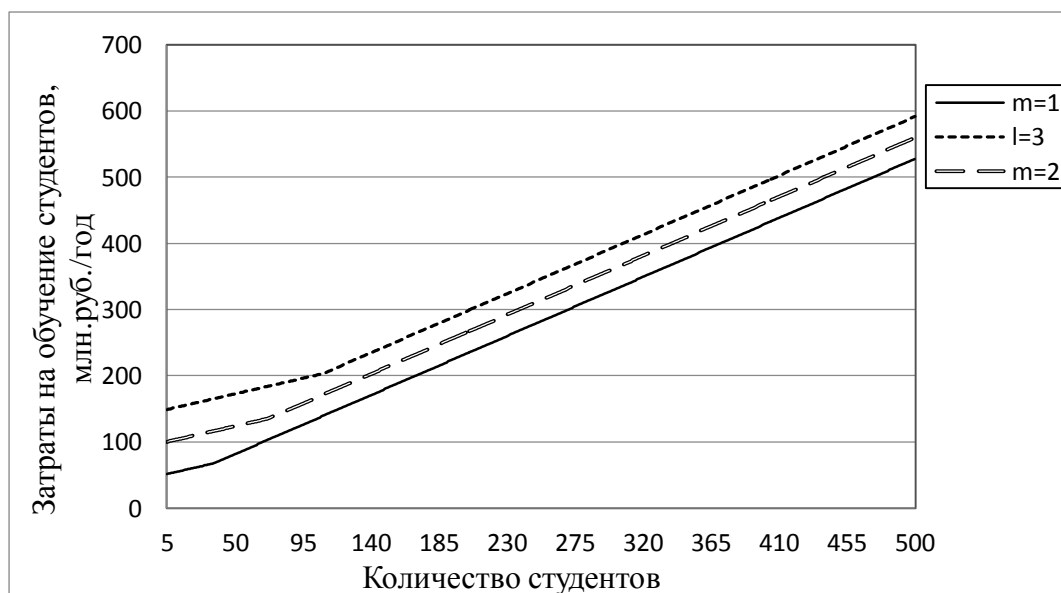


Рис. 2. Зависимость затрат на науку и образование по фондоемкому направлению от общего числа студентов, которых необходимо подготовить по данному научному направлению, при сетевой структуре с 3 вузами с 1 или 2 национальными лабораториями и при вертикально-интегрированной структуре с 3 исследовательскими университетами

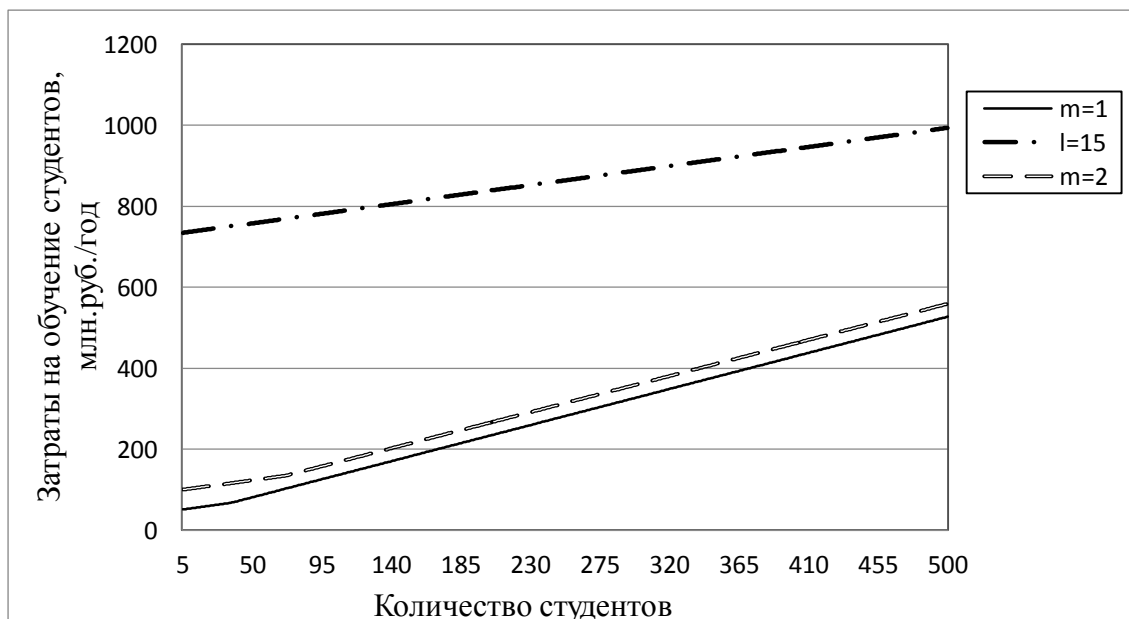


Рис. 3. Зависимость затрат на науку и образование по фондоемкому направлению от общего числа студентов, которых необходимо подготовить по данному научному направлению, при сетевой структуре с 15 вузами с 1 или 2 национальными лабораториями и при вертикально-интегрированной структуре с 15 исследовательскими университетами

Оценка затрат на подготовку студентов по научному направлению «экономика». По направлению «экономика», которое здесь рассматривается как пример относительно «малофондоемкой» области науки, были использованы следующие исходные данные: $u_{крит} = 20$, $\beta = 0,6$, $\alpha_1 = 25$, $\alpha_2 = 5$, $c_u = 0,84 \text{ млн.руб./год}$ – заработная плата ученого; $c_2 = 0,3 \text{ млн.руб./год}$ – заработная плата ученого-преподавателя (с учетом работы в вузе на четверть ставки); $c_1 = 0,6 \text{ млн.руб./год}$ – заработная плата «чистого» преподавателя; $c_{ст} = 0,3 \text{ млн.руб./год}$ – стоимость годового обучения студента; $C_{ЭБ} = 0,03 \text{ млн.руб./год}$ – объем экспериментальной базы; $t = 20 \text{ лет}$ – срок эксплуатации экспериментальной базы. Рассмотрено два значения количества национальных лабораторий: $m = 1, m = 2$; три значения количества университетов (вузов): $l = 1, l = 2, l = 15$.

На рис. 4–6 представлена зависимость затрат на обучение студентов по направлению подготовки «экономика» в зависимости от количества студентов, которых решено подготовить по данному научному направлению, при разной структуре системы организации образования и науки. И в данном случае, как для фондоемкой области науки, наименьшие затраты для подготовки студентов по рассмотренному научному направлению экономика получаются при сетевой организации научной и образовательной сфер, при количестве национальных лабораторий равном 1, или при вертикальной организации при количестве исследовательских

университетов равном 1. Причем для малого числа студентов наибольшая экономия получится при сетевой организации науки и образования. Но здесь уже выигрыш относительно вертикально-интегрированной организации науки и образования меньше, чем для фондоемкой области науки и техники.

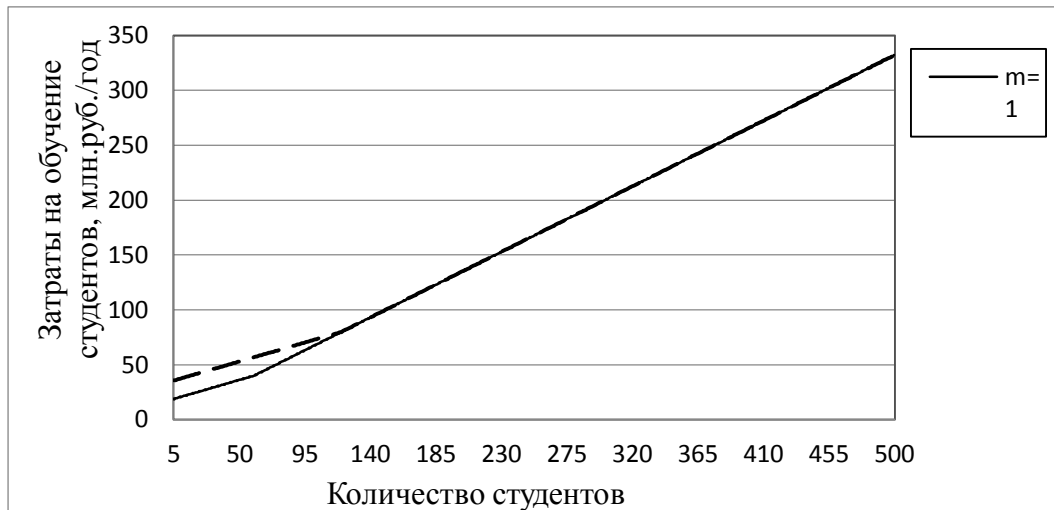


Рис. 4. Зависимость затрат на науку и образование по направлению «экономика» от общего числа студентов, которых необходимо подготовить по данному научному направлению, при сетевой структуре с 1 вузом с 1 или 2 национальными лабораториями и при вертикально-интегрированной структуре с 1 исследовательским университетом

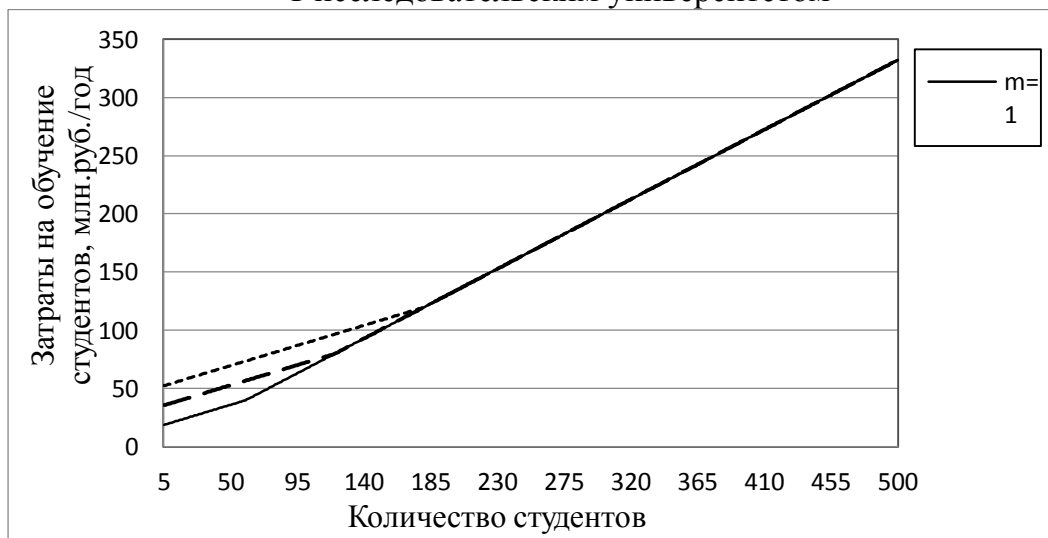


Рис. 5. Зависимость затрат на науку и образование по направлению «экономика» от общего числа студентов, которых необходимо подготовить по данному научному направлению, при сетевой структуре с 3 вузами с 1 или 2 национальными лабораториями и при вертикально-интегрированной структуре с 3 исследовательскими университетами

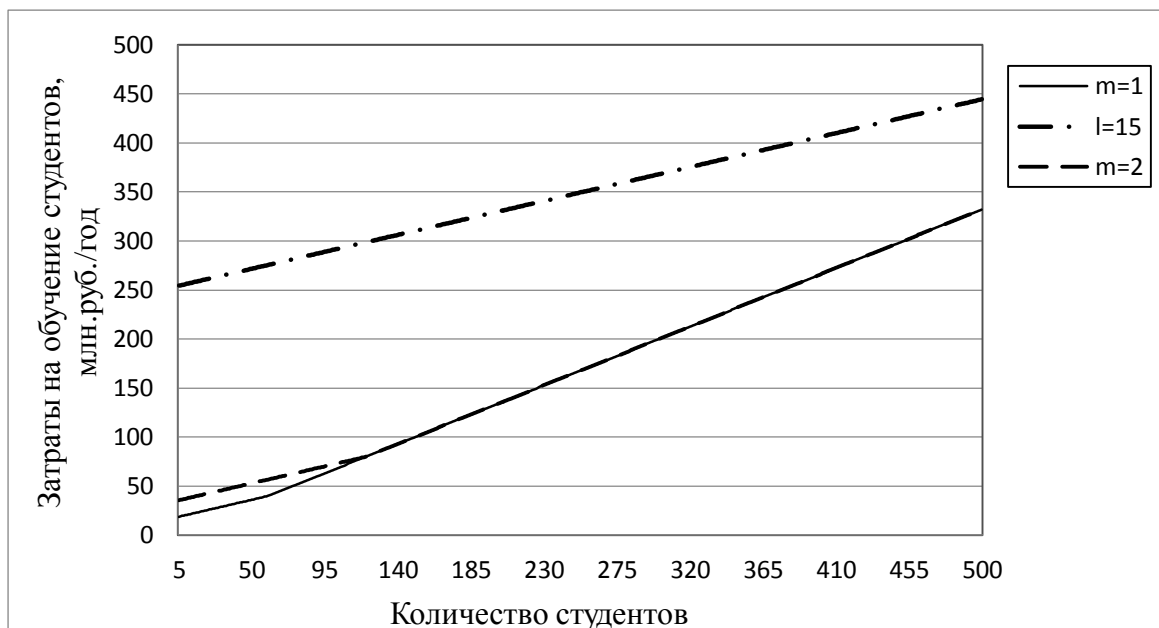


Рис. 6. Зависимость затрат на науку и образование по направлению «экономика» от общего числа студентов, которых необходимо подготовить по данному научному направлению, при сетевой структуре с 15 вузами с 1 или 2 национальными лабораториями и при вертикально-интегрированной структуре с 15 исследовательскими университетами

Заключение. Для подготовки малого числа студентов, вне зависимости от фондоемкости научного направления и направления подготовки специалистов, наименьших затрат (при наличии нескольких вузов) требует сетевая организация научной и образовательной сфер (по сравнению с их вертикальной интеграцией в исследовательских университетах). Но и для относительно большого числа студентов сетевая структура организации науки и образования позволяет наиболее значительно снизить издержки на развитие науки и подготовку студентов (в сравнении с их вертикальной интеграцией) именно по фондоемким научным направлениям.

Библиографический список

1. Селезнева, И.Е. Экономико-математические модели организационной структуры научной и образовательной сфер / И.Е. Селезнева, В.В. Ключков // Друkerовский вестник. – 2022. – № 1. – С. 78–89.
2. Московский физико-технический институт: официальный сайт. – URL: <https://mipt.ru/education/chairs/afe> (дата обращения: 19.07.2022).
3. Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского: официальный сайт. – URL: <http://www.tsagi.ru/institute/lab220> (дата обращения: 19.07.2022).

4. Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского: официальный сайт. – URL: http://www.tsagi.ru/experimental_base (дата обращения: 19.07.2022).

АНАЛИЗ МЕТОДОВ КАТЕГОРИЗАЦИИ ТЕКСТОВЫХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ ОБРАБОТКИ ОБРАЩЕНИЙ, ПОСТУПИВШИХ НА ГОРЯЧУЮ ЛИНИЮ ПРЕЗИДЕНТА РФ

В.С. Серова, Е.В. Бунова, И.Н. Голлай

Разработана система автоматизации категоризации текстовых обращений, поступающих на «горячую» линию президента РФ в виде веб-приложения. Веб-приложение реализовано при помощи фреймворка Django на языке Python и JavaScript-библиотекой React для создания пользовательских интерфейсов. Категоризация обращений происходит с использованием сверточной нейронной сети, встроенной в веб-приложение. Разработанная информационная система позволяет ускорить процесс обработки обращений граждан к Президенту при их категоризации по темам.

Ключевые слова: анализ текстовых данных, нейронные сети, сверточные нейронные сети, информационная система, категоризация.

В настоящее время большое внимание со стороны федеральных органов и руководства РФ уделяется вопросам повышения «качества жизни» населения. Президент России В.В. Путин в Посланиях Федеральному собранию неоднократно заявлял о необходимости повышения уровня жизни, обеспечении достойной, продолжительной жизни россиян и повышении ее качества как о цели социально-экономического развития страны и реализации Национальных проектов [1, 2]. Целевые ориентиры по повышению качества жизни россиян были сформулированы в Указе Президента № 204 от 7 мая 2018 года «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [3]. 13 июля 2020 года на Заседании Совета по стратегическому развитию и национальным проектам Президент России В.В. Путин заявил: «... мы обсудим ключевые направления развития страны, наших дальнейших действий, а их главная, объединяющая задача – это повышение качества жизни граждан. Еще раз хочу подчеркнуть: в центре всех наших решений, планов, программ должен находиться человек» [4].

Поэтому одним из мероприятий, проводимых Президентом России В.В. Путиным, является ежегодная «горячая линия», на которую каждый гражданин может отправить вопрос о решении актуальных для него проблем. Так, например, только по Челябинской области в 2021 г. на

«горячую линию» Президента РФ поступило около 7 тыс. обращений от граждан.

Обработать быстро данные обращения с использованием ручных методов невозможно, а некоторые обращения от граждан требуют быстрого реагирования. Поэтому актуальной задачей является разработка программного приложения для автоматизации категоризации поступивших обращений по категориям.

Одной из общественно значимых задач информационного поиска является классификация текстовых данных по категориям. Классификация текстовых данных подразумевает под собой присвоение тексту определенной категории из некоторого набора категорий, которые заранее определены с помощью анализа содержания текстовых данных. К самому простому и древнему методу классификации документов относится ручная обработка текстовых данных, примеры которой представлены в СМИ и библиотеках, где художественные тексты разделены на жанры. Ручная классификация не позволяет быстро обрабатывать большие объемы текстов в отличие от автоматических методов классификации текстовых данных. Подобные методы обширно применяются современными интернет-системами: новостные агрегаторы используют их для тематической рубрикации новостей, почтовые сервисы, применяют алгоритмы для обнаружения спама при фильтрации почты, поисковые системы обеспечивают таким образом разнообразие поисковой выдачи, и т. д.

В задачах текстовой классификации часто используются методы машинного обучения. Обуславливается это несколькими причинами, такими как высокая скорость классификации и присутствие человека только в процессе формирования обучающей выборки прецедентов.

По этой причине в данной работе рассматриваются задача автоматической классификации текстов и вопросы применения методов машинного обучения.

У задачи автоматической классификации текстов существуют некоторые особенности.

1. Обращения на «горячую линию» Президента РФ являются текстами на естественном языке. Они не имеют четкой формализации и структуры, не являются техническими.

2. Классы не зависят друг от друга.

3. Наличие большого количества исследований и публикаций, содержащих оценку качества алгоритмов.

Нейронные сети постоянно применяются в задачах анализа текстов. Например, в статьях [5, 6] проводится анализ задачи на русском языке с различной семантической направленностью, а в статье [7] показано решение задачи классификации судебных актов. По результатам анализа

классификации следует вывод о рациональном использовании методов машинного обучения и text mining при решении классификационных задач.

Использование классификации используется также в таможенных тарифах. В своих статьях авторы высказывают предположение, что ошибки классификации происходят вследствие слабого программного обеспечения [30] и предлагают конфигурацию представления данных с целью создания потенциального программного продукта [8]. В статье [9] представлена схема использования процесса автоматической классификации на основании использования лингвостатистического и синтаксического анализа налоговых деклараций на товары.

В статье [10] авторами предлагается автоматизация системы для обнаружения кода гармонизированной системы описания и кодирования товаров, которая основана на визуальных свойствах продукта и текстовом анализе пояснений. Используя извлеченные корни можно реализовать частотные таблицы для каждой из категорий, содержащих вероятности слов. Данный подход строится на методах интеллектуального анализа текста [11].

В статье [12] для классификации данных авторами используются сверточные нейронные сети, обосновывая это тем, что сверточная нейронная сеть имеет ряд значительных преимуществ, из-за которых она обходит по вычислительной мощности алгоритмы распознавания прошлых десятилетий [13]. Сверточная нейронная сеть не выделяет большое количество памяти для хранения признаков, извлеченных в процессе работы. Также преимуществом использования сверточной нейронной сети можно назвать быструю скорость обучения, которая достигается благодаря минимизации количества используемых параметров. Поэтому можно сделать вывод, что производительность сверточной нейронной сети имеет показатели, которые превышают в несколько раз показатели производительности прочих нейронных сетей, используемых в задачах классификации.

Сверточные нейронные сети представляют собой продвинутые способы решения задач компьютерного зрения с использованием универсального, масштабируемого, самодостаточного подхода, который можно применять к разным предметным областям без необходимости знать о них что-либо. Больше не требуется создавать признаки самим, поскольку нейросеть сама учится извлекать полезные признаки при достаточном обучении и объеме данных.

Этапы разработки автоматизированной системы представлены на рисунке 1.

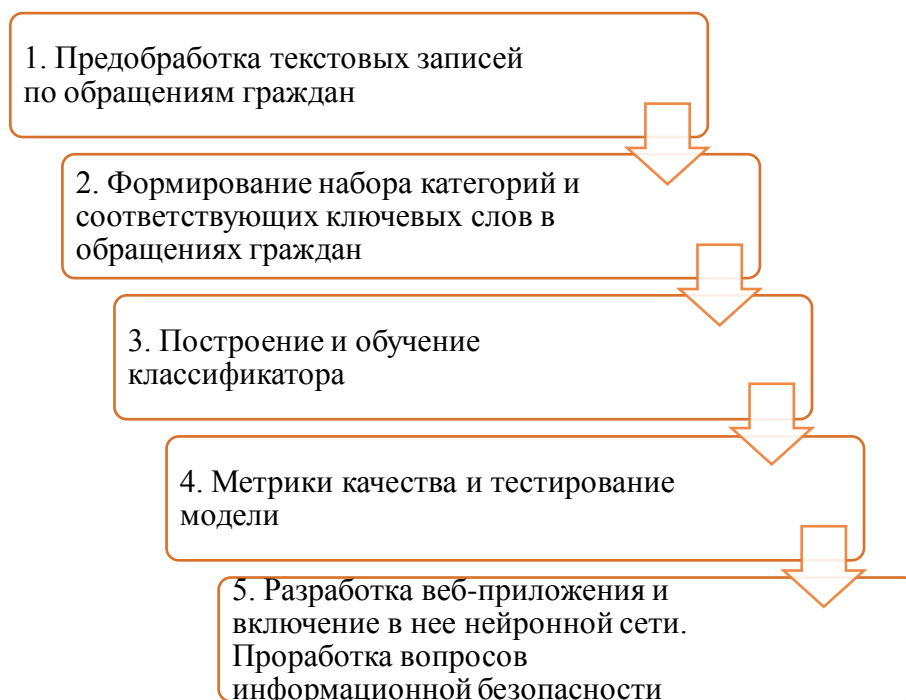


Рис. 1. Этапы разработки информационной системы

1 этап. Предобработка текстовых записей по обращениям граждан

Количество обращений по Челябинской области за 2021 год составляет около 7 тысяч записей.

Для работы с представленными данными необходимо осуществить очистку текстовых данных от ненужных символов и знаков препинания и преобразовать его в нижний регистр, чтобы в дальнейшем применить токенизацию и фильтрацию. Токенизация разделяет текст на слова при помощи регулярных выражений, что позволяет исключить часто встречаемые слова. Без применения данных инструментов модель может недоучиться или наоборот переобучиться. Для следующих этапов разработки будут использованы только одиночные леммы анализируемого текста.

2 этап. Формирование набора категорий и соответствующих ключевых слов в обращениях граждан

Для дальнейшей работы были отобраны 8 наиболее часто встречаемых категорий, обращений в которых больше 300:

- COVID;
- вопросы пенсий и пенсионного стажа;
- газоснабжение;
- жилье;
- льготы и соц. помощь;
- многоквартирные дома;
- образование;

– природа, экология.

В ходе программной реализации был создан словарь слов, которые не несут смысловой нагрузки и могут быть удалены, чтобы избежать переобучения модели. Также был создан словарь ключевых слов для определения категории для каждого обращения граждан.

В дальнейшем будет применяться one-hot кодирование. One-hot кодирование используется для преобразования категориальных переменных в числовые значения. Перед дальнейшим анализом данных категориальные значения сопоставляются с целочисленными значениями. Каждый столбец содержит «0» или «1», в зависимости от того, в какой столбец он был помещен.

3 этап. Построение и обучение классификатора

Для создания модели сверточной сети Sequential были использованы библиотеки оптимизаторов Adam, RMSprop, SGD. Оптимизатором является алгоритм, который применяется для изменения веса и скорости обучения для достижения корректной и быстрой работы модели.

Для решения поставленной задачи также был использован класс обратных вызовов (callbacks). Callback – набор функций, применяемых в определенные моменты во время процедуры обучения. Список callback'ов (именованным аргументом callbacks) передается методу .fit() Sequential для обработки данных.

Модель Sequential, представляющая собой линейный стек слоев, которые добавлены с помощью метода .add(), где Dense(1024), Dense(512), Dense(32) – это полносвязный слой с 1024, 512 и 32 соответственно скрытыми нейронами. Необходимо подобрать оптимальные размеры числа тренировочных объектов (батча). Модель обучается, разбивая данные на «пакеты» размером batch_size, и последовательно итерируя весь датасет заданным количеством «эпох».

4 этап. Метрики качества модели и тестирование модели

Тестирование модели происходит на отдельном csv-файле, в котором будет 20% от всей выборки.

Для оценки качества работы алгоритма на каждом из классов по отдельности используются метрики precision (точность) и recall (полнота).

Precision можно интерпретировать как долю объектов, названных классификатором положительными и при этом действительно являющимися положительными, а recall показывает, какую долю объектов положительного класса из всех объектов положительного класса нашел алгоритм.

Результаты оценки качества работы алгоритма на каждом из классов представлены в таблице 1.

Результаты оценки качества работы алгоритма

№ категории	Precision	recall
1	0,76	0,7
2	0,82	0,67
3	0,8	0,91
4	0,65	0,75
5	0,72	0,78
6	0,69	0,72
7	0,69	0,62
8	0,57	0,73

5 этап. Разработка веб-приложения и включение в нее нейронной сети.

Веб-приложение состоит из одного проекта, включающего в себя следующие функции:

- вход в систему зарегистрированному пользователю;
- загрузка файла исходных данных для обработки;
- обработка данных нейронной сетью;
- выгрузка результатов обработки нейронной сетью.

Интерфейс веб-приложения представлен на рисунках 2 и 3.

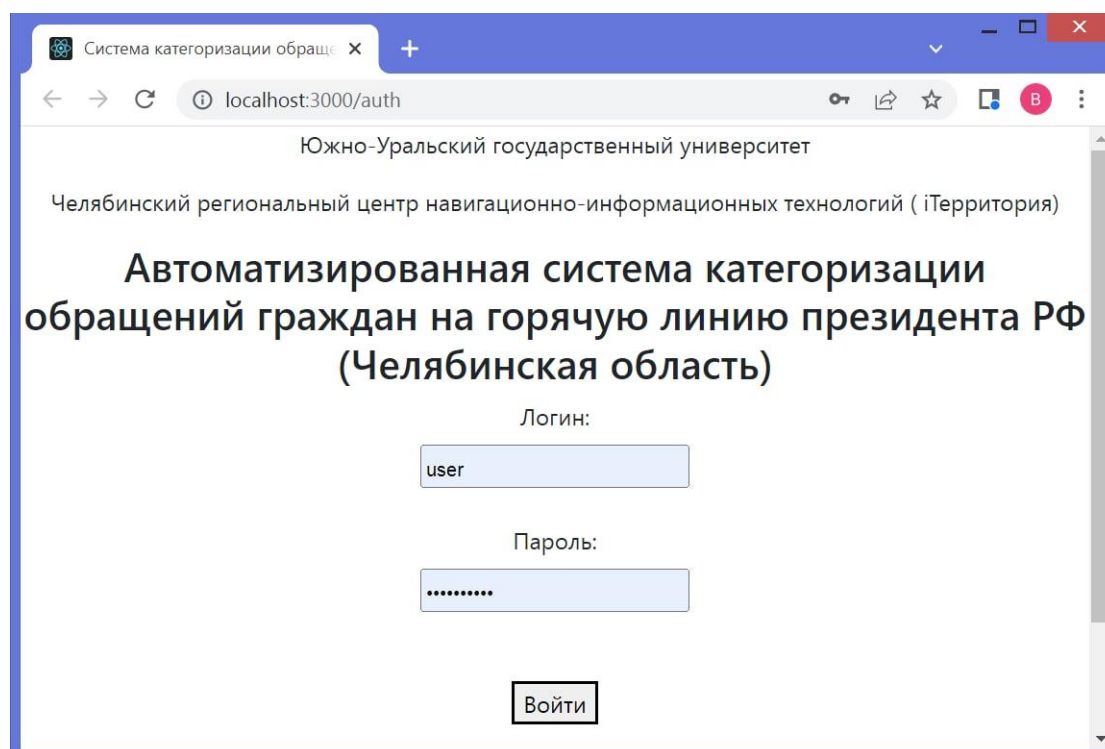


Рис. 2. Интерфейс страницы авторизации

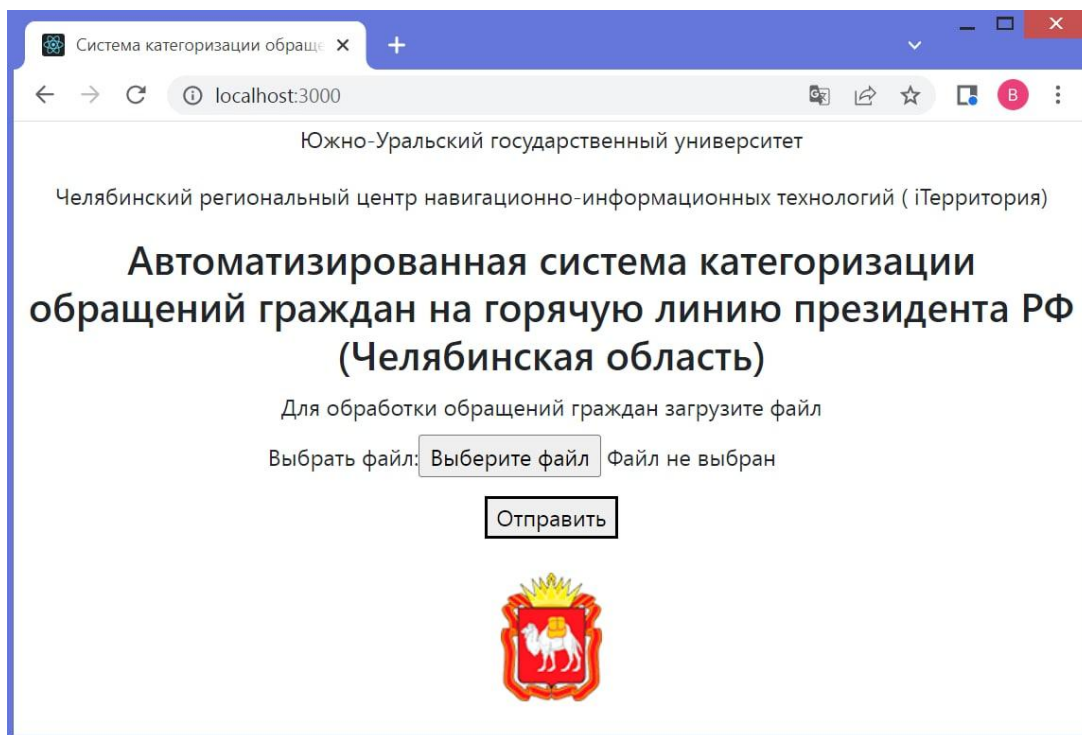


Рис. 3. Интерфейс страницы загрузки файла с поступившими обращениями

Библиографический список

1. Послание Президента Федеральному Собранию 15 января 2020 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/62582> Дата обращения: 20.12.2021 г.
2. Послание Президента Федеральному Собранию 20 февраля 2019 года [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/59863> Дата обращения: 20.12.2021 г.
3. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». Вступил в силу с 7 мая 2018 года [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> Дата обращения: 20.12.2021 г.
4. Заседание Совета по стратегическому развитию и национальным проектам 13 июля 2020 года [Электронный ресурс] Режим доступа: URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/63635> Дата обращения: 20.12.2021 г.
5. Алексеев А.А., Катасев А.С., Кириллов А.Е., Кирпичников А.П. Классификация текстовых документов на основе технологии text mining // Вестн. Казанского технологич. ун-та. 2016. Т. 19. № 18. С. 116–119.
6. Андреева Е.И., Кушнер Г.Ф. Выбор объектов контроля правильности классификации товаров с учетом соотношения кода ТН ВЭД и величины их таможенной стоимости // Вестн. Российской таможенной академии. 2016. № 3. С. 32–38.

7. Андреева Е.И., Говоров В.В. Методическое обеспечение таможенного контроля правильности классификации товаров в современных условиях // Вестн. Российской таможенной академии. 2019. № 3. С. 69–77.
8. Васина Е.Н., Филиппова Л.А. Методы и модели классификации для автоматического определения кода товара по товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности // Вестн. Российской таможенной академии. 2017. № 2. С. 81–88.
9. Андреева Е.И., Суглобов А.Е. Искусственный интеллект: перспективы цифровизации таможенных технологий // Russ. J. of Management. 2019. Т. 7. № 2. URL: <https://riorpub.com/ru/nauka/article/29659/view> (дата обращения: 25.09.2021). DOI: 10.29039/article_5d4846bd0cd8d6.84213476.
10. Turhan B., Gozde B. Akar, Turhan C., Yukse C. Visual and textual feature fusion for automatic customs tariff classification. Proc. IEEE 16th Int. Conf. Inform. Reuse and Integration, 2015, pp. 76–81. DOI: 10.1109/IRI.2015.22.
11. Feinerer I., Hornik K., Meyer D. Text Mining Infrastructure in R. JSS, 2008, vol. 25, iss. 5, 54 p. DOI: 10.18637/jss.v025.i05.
12. Иванов С.А., Никольская К.Ю., Радченко Г.И., Соколинский Л.Б., Цымблер М.Л. Концепция построения цифрового двойника города // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2020. Т. 9, № 4. С. 5–23. DOI: 10.14529/cmse200401.
13. Фомин В.В., Фомина И.К., Осочкин А.А. Классификация текстов на основе частотного и морфологического анализов с применением алгоритмов Data-mining // Информатизация образования и науки. 2016. Т. 31. № 3. С. 137–152.

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРСОНАЛОМ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНО-ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ПРОГРАММНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

С.А. Федосеев, Д.Л. Горбунов

Приведен прототип системы поддержки принятия решений, позволяющей оценить целесообразность приема на работу соискателя вакантной должности в зависимости от результатов анализа его резюме, а также целесообразность продолжения сотрудничества с работником в зависимости от результатов анализа его деятельности на предприятии. Данный прототип системы поддержки принятия решений позволяет оценить значение коэффициента селекции предприятия – параметра управления динамикой квалификации кадров системы рынка труда, а также входные данные для прогноза по существующей модели.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, управление персоналом, рынок труда, системно-динамическая модель.

В условиях общей нестабильной мировой экономической ситуации как никогда актуальны вопросы управления персоналом. Конъюнктура рынка труда как парадигма всех экономических процессов страны находится под особым вниманием современной науки. Автоматизация процессов исследования и прогнозирования рынка труда в разрезе квалификации рабочей силы всегда представляет научный интерес, поскольку от уровня квалификации субъектов рынка труда напрямую зависит качество производимой продукции, что особенно важно в условиях импортозамещения.

Например, в [1, 2] рассмотрены регрессионные модели текучести кадров, мало пригодные для анализа динамических процессов рынка труда. В работах [3, 4] предлагается дифференциальная системно-динамическую модель рынка труда с конечным количеством источников спроса, а в [5] описаны способы расчета входных параметров. Согласно предложенной в [3] концепции, субъекты рынка труда делятся на три квалификационных категории, в зависимости от спроса на их труд у работодателей. Принята гипотеза о том, что субъекты высокой категории, будучи трудоустроенными, не увольняются; субъекты низкой категории, будучи трудоустроенными, увольняются в каждый момент времени; из трудоустроенных субъектов средней категории в каждый момент времени увольняется определенная их доля, равная k ($k \in [0;1]$). Параметр k

называется «коэффициент селекции» - чем меньше его значение, тем лучше работа с кадрами на предприятии. Особенно это касается перспектив молодых сотрудников. В системно-динамической модели, описанной в [4, 5] k – параметр управления динамикой кадров на рынке труда в разрезе квалификации.

Динамические процессы рынка труда с конечным количеством источников спроса, равным q , описывается $3q$ -мерной системой нелинейных дифференциальных уравнений (1) [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\alpha}_j(t) = \frac{A - M \sum_{i=1}^q \alpha_i(t)}{N} (\gamma_j(t) + k_j \beta_j(t)); \\ \dot{\beta}_j(t) = \frac{B - M \sum_{i=1}^q \beta_i(t)}{N} (\gamma_j(t) + k_j \beta_j(t)) - k_j \beta_j(t); \\ \dot{\gamma}_j(t) = \frac{G - M \sum_{i=1}^q \gamma_i(t)}{N} (\gamma_j(t) + k_j \beta_j(t)) - \gamma_j(t). \end{array} \right. \quad (1)$$

В работе [3] также найдено точное аналитическое решение системы (1). На основе (1) предложена системно-динамическая модель рынка труда с четырьмя источниками спроса [4]. Ее представление в AnyLogic показано на Рис. .

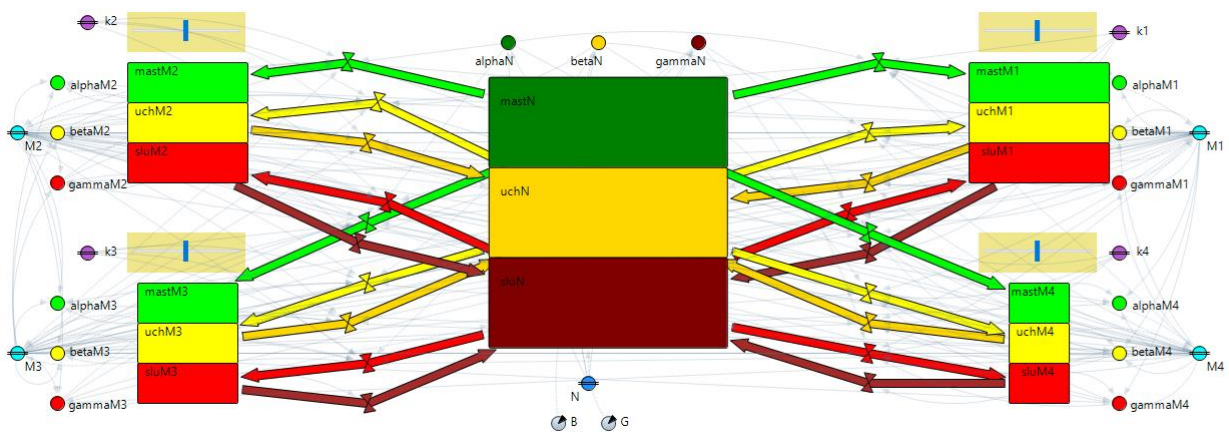


Рис. 1. Системно-динамическая модель рынка труда

Данная модель пригодна для прогнозирования изменения конъюнктуры реально существующего рынка труда [5]. Для практического применения модели необходим алгоритм присвоения исходных значений входным

параметрам. В [5] предложены три различных способа расчета входных параметров, согласно текущему состоянию конъюнктуры рынка труда. На Рис. приведен один из них (X и Y задаются экспертно).

Квалификационная категория субъекта рынка труда			
A	B+	B-	G
<i>Работники со стажем на предприятии не менее X лет</i>	<i>Работники со стажем на предприятии менее X лет</i>	<i>Выбывшие работники со стажем на предприятии не менее Y лет</i>	<i>Выбывшие работники со стажем на предприятии менее Y лет + <u>число вакансий</u></i>

$$k = \frac{(B-) + (G)}{(A) + (B+) + (B-) + (G)}$$

Рис. 2. Способ расчета начальных значений входных параметров

В настоящей работе предлагается прототип системы поддержки принятия решений (СППР), оказывающий работодателю помощь в управлении персоналом на основе анализа резюме соискателей, личных дел сотрудников и уволенных. Прототип СППР рекомендует квалификационную категорию для каждого субъекта рынка труда, так или иначе связанного с предприятием-работодателем. Согласно [5], квалификационная категория субъектам рынка труда присваивается только в зависимости от стажа работы (Рис.). Прототип СППР наряду со стажем учитывает уровень образования, личные достижения и размер заработной платы анализируемого субъекта рынка труда. Поэтому предлагаемый прототип СППР допускает, что среди трудоустроенных на данном предприятии субъектов рынка труда могут быть субъекты категорий B- и G, что снимает ограничения методики, предложенной в [5].

Прототип СППР помогает не только рассчитать начальные значения входных параметров модели и значение коэффициента селекции k для данного предприятия, но и проанализировать резюме соискателя вакантной должности и получить рекомендацию относительно приема новых сотрудников. Кроме того, анализ личного дела сотрудника может дать информацию о возможных дальнейших перспективах его карьерного роста на данном предприятии и дать рекомендацию относительно работы с

отдельно взятым субъектом (например, повысить в должности или уволить).

Набор атрибутов и их значений для сущности «субъект рынка труда», анализируемой прототипом СППР, приведен в табл. 1

Таблица 1

Описание субъекта рынка труда для прототипа СППР

Атрибут	Описание	Значения
Тип субъекта рынка труда	Связь исследуемого субъекта рынка труда с работодателем	- Соискатель - Сотрудник - Уволен
Образование	Уровень образования субъекта рынка труда	- Среднее - Среднее специальное - Высшее - Ученая степень
Портфолио	Личные достижения субъекта рынка труда, экспертно оцениваемые работодателем в баллах	- Выдающееся - Хорошее - Как у всех - Отсутствует
Опыт работы	Стаж работы субъекта рынка труда в месяцах	- Более 9 лет - От 6 до 9 лет - От 3 до 6 лет - Менее 3 лет
Размер заработной платы	Размер заработной платы субъекта рынка труда в у.е. (для соискателей – на предыдущем месте работы, для сотрудников и уволенных – у данного работодателя)	- Высокая - Выше среднего - Ниже среднего - Низкая
Фактический рейтинг	Рейтинг субъекта рынка труда, определяющий его принадлежность к квалификационной категории	[0; 4]
Нормированный рейтинг	Вспомогательный показатель	{1; 4}
Категория	Категория субъекта рынка труда в терминологии системно-динамической модели	A, B+, B-, G
Квалификация	Квалификация субъекта рынка труда в терминологии системно-динамической модели	- Высокая - Средняя - Низкая

Продолжение таблицы 1

Вердикт	Расшифровка результатов анализа для пользователя	- Ценный кадр - Перспективный кадр - На данный момент перспективы отсутствуют - Не нужен фирме
---------	--	---

На данный момент прототип СППР реализован в MS Excel. (Рисунок 3)

▲
▼

Сотрудник

Образование:	1	▲ ▼	Учёная степень	5 степень									
Опыт работы:	3,9	▲ ▼	менее 3 лет	23 мес	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Фактический рейтинг</td><td style="background-color: #FFFF00; text-align: center;">1,98</td></tr> <tr><td>Нормированный рейтинг</td><td style="text-align: center;">1,98</td></tr> <tr><td>Категория</td><td style="text-align: center;">A</td></tr> <tr><td>Квалификация</td><td style="text-align: center;">Высокая</td></tr> </table>	Фактический рейтинг	1,98	Нормированный рейтинг	1,98	Категория	A	Квалификация	Высокая
Фактический рейтинг	1,98												
Нормированный рейтинг	1,98												
Категория	A												
Квалификация	Высокая												
Портфолио:	2,1	▲ ▼	Хорошее	65 балл									
Размер зарплаты:	2	▲ ▼	выше среднего	33 у.е.	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">Вердикт:</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">Ценный кадр</td> </tr> </table>	Вердикт:	Ценный кадр						
Вердикт:	Ценный кадр												

Рис. 3. Вид прототипа СППР в MS Excel

Фактический рейтинг субъекта рынка труда вычисляется путем нечеткого комплексного оценивания [6, 7] на основе двух матриц свертки размерностью 4x4, полученных путем попарного совмещения оценок по 4-балльной шкале значений шкал «Образование» и «Опыт работы» и, соответственно, шкал «Портфолио» и «Размер зарплаты». Эффективность матриц 4x4 показана в [7].

Для каждого типа субъекта рынка труда категория и квалификация присваиваются по индивидуальному правилу, согласно табл. 2

Таблица 2

Правила присвоения квалификации

Тип субъекта рынка труда	Диапазон значений фактического рейтинга	Категория, квалификация	Вердикт
Соискатель	[1; 2,5]	A, Высокая	Ценный кадр
	(2,5; 3,5]	B+, Средняя	Перспективный кадр
	(3,5; 4]	B-, Средняя	На данный момент перспективы отсутствуют

Продолжение таблицы 2

Сотрудник	[1; 2]	А, Высокая	Ценный кадр
	(2; 3]	В+, Средняя	Перспективный кадр
	(3; 4]	В-, Средняя	На данный момент перспективы отсутствуют
	4	Г, Низкая	Не нужен фирме
Уволен	[1; 2]	В-, Средняя	На данный момент перспективы отсутствуют
	(2; 4]	Г, Низкая	Не нужен фирме

Следует обратить внимание, что присвоение категории уволенному субъекту необходимо для расчета коэффициента селекции k . Присвоение уволенным субъектом категорий В+ и А невозможно по определению этих категорий в терминологии [3].

Кадровые решения работодателя влияют на коэффициент селекции k предприятия, который является параметром управления динамикой кадров в разрезе квалификации. Изменить значение k в нужную сторону можно, например, объявив сокращение штата или наоборот расширение предприятия. Таким образом предложенная системно-динамическая модель в совокупности с прототипом СППР являются эффективным инструментом управления персоналом на предприятиях различных отраслей.

Заключение. Для расчета входных показателей существующей системно-динамической модели предложен прототип СППР. Данный прототип СППР позволяет оценить резюме соискателя вакантной должности с целью предварительной оценки целесообразности его приема на работу. Также данный прототип СППР позволяет оценить перспективы карьерного роста действующих сотрудников и рассчитать коэффициент селекции путем присвоения квалификационной категории уволенным сотрудникам предприятия.

На данный момент прототип реализован в MS Excel на основе алгоритмов нечеткого комплексного оценивания. Прототип открыт для дальнейшего развития и усложнения с целью повышения эффективности рекомендаций.

Библиографический список

1. Кадырова А. Р. Текучесть кадров: обзор проблемы. Ч. 1. Экономико-математические модели текучести высшего руководства // Проблемы управления. – 2015. – Вып. №2. – С. 2-12.
2. Кадырова А. Р. Текучесть кадров: обзор проблемы. Ч. 2. Экономико-математические модели текучести неруководящих сотрудников // Проблемы управления. – 2015. – Вып. №3. – С. 2-11.
3. Горбунов Д. Л., Федосеев С. А. Модель управления конъюнктурой рынка труда предприятия в виде интегрируемой в квадратурах системы нелинейных дифференциальных уравнений // Прикладная математика и вопросы управления. – 2019. – № 4. – С. 90-101. – DOI: 10.15593/2499-9873/2019.4.06
4. Горбунов Д. Л., Федосеев С. А. Системно-динамическая модель прогнозирования квалификации кадрового состава промышленного предприятия // Математическое и компьютерное моделирование в экономике, страховании и управлении рисками. – 2020. – № 5. – С. 66-69.
5. Горбунов Д. Л., Федосеев С. А. Модель прогнозирования муниципального рынка труда // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2022. – № 3. (принят к публикации)
6. Алексеев А. О. Исследование альтернативных подходов к теоретико-множественным операциям над нечеткими множествами в процедуре нечеткого комплексного оценивания // Прикладная математика и вопросы управления. – 2015. – № 1. – С. 60-72.
7. Алексеев А. О., Калентьева А. С., Вычегжанин А. В., Климец Д. В. Алгоритмические основы нечеткой процедуры комплексного оценивания объектов различной природы // Фундаментальные исследования. – 2014. – №3 (часть 3). – С. 469-474

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ФРЭНЧА К МОДЕЛИ ГРАНОВЕТТЕРА*Д.Н. Федянин*

Приведены данные о результатах влияния на равновесие в модели Грановеттера от процедуры агрегирования. Для агрегирования применяется модель Фрэнча с одинаковыми параметрами влияния, однако с разным выбором того, что считать мнением.

Ключевые слова: модель Грановеттера, модель Фрэнча, социальная система, модель конкуренции.

Рассмотрим множество агентов $N = \{0, \dots, n-1\}$. Для каждого агента введем параметр, который мы назовем порог, определяемый функцией $\theta: N \rightarrow N$ так, что порогом агента с номером j является величина $\theta(j)$. Соединим агентов в сеть функцией влияния $W: N \rightarrow [0, 1]$, такой, что ее $W(i)$ – влияние i -го агента на итоговое мнение агентов после того как они придут к консенсусу. Мы ограничимся лишь случаями, когда консенсус существует.

Пороги играют важную роль для модели Грановеттера [1], суть которой в том, чтобы описать поведение агентов, если каждый из них действует в том и только в том случае, если количество агентов, которое, по его ожиданиям, подействует, превышает значение его порога. Величина действия в модели не имеет значения, и предполагает, что каждый агент имеет только две стратегии – действовать или не действовать. Об это модели известно, что если упорядочить агентов по порогам и построить график порогов, то пересечение с биссектрисой с некоторой точностью даст положение равновесия. Подробным исследованиям посвящены книги и диссертации, однако для нашего исследования достаточно значимость пересечения с графиком порогов, упорядоченных по величине.

Функция влияния имеет важное значение для модели Фрэнча [2], задача которой описать изменение мнений агентов на основе известных начальных мнений и влияния агентов. Развитием модели Фрэнча является модель Де Гроота и многие другие, однако для нашего исследования сама динамика не важна, а весь интерес в установившихся мнениях. Суть модели Фрэнча в том, что конечное мнение группы агентов есть линейная комбинация всех начальных мнений с весами равными влиятельности этих агентов.

Введем обозначения $S(i)$ – i -ый по величине порог, $\theta_i(j)$ – представление i -го агента о пороге j -го агента, $S_i(j)$ – представление порога i -го агента о величине j -го по величине порога.

Рассмотрим, и это ключевой момент, если представления агентов отличаются, как их агрегировать. Мы сконцентрируемся на двух возможных вариантах.

В первом варианте агенты приходят к консенсусу по поводу величины порога каждого из агентов, затем упорядочивают пороги и по ним находят равновесие с помощью сравнения с биссектрисой.

Во втором варианте агенты приходят к консенсусу используя в качестве мнения сразу кривую порогов, упорядоченных по возрастанию, затем, если потребуется, снова упорядочивают и по ним находят равновесия с помощью сравнения с биссектрисой.

Легко увидеть, что во втором случае дополнительное упорядочение не требуется, т.к. можно записать два выражения для сравнения порогов, затем умножить оба на влиятельности агентов и сложить – очевидно, что новое неравенство будет верно, и значит монотонность сохранится.

Пример 1. Два агента с представлениями о порогах $\theta_1(1), \theta_1(2), \theta_2(1), \theta_2(2)$ и влиятелями $W(1)$ и $W(2)$.

Пусть $\theta_1(1) < \theta_1(2)$, то $S_1(1) = \theta_1(1), S_1(2) = \theta_1(2)$ и пусть $\theta_2(1) < \theta_2(2)$, то $S_2(1) = \theta_2(1), S_2(2) = \theta_2(2)$.

Для первого сценария тогда получаем

$$\theta_{12}(1) = W(1)\theta_1(1) + W(2)\theta_2(1) < \theta_{12}(2) = W(1)\theta_1(2) + W(2)\theta_2(2),$$

Ясно, что второй сценарий приведет к тому же результату. Аналогично не будет различий и если $\theta_1(1) > \theta_1(2), \theta_2(1) > \theta_2(2)$.

Пример 2. Пусть $\theta_1(1) < \theta_1(2)$, то $S_1(1) = \theta_1(1), S_1(2) = \theta_1(2)$ и пусть $\theta_2(1) > \theta_2(2)$, то $S_2(1) = \theta_2(2), S_2(2) = \theta_2(1)$.

В этом случае для первого сценария получаем также как и в примере 1:

$$\theta_{12}(1) = W(1)\theta_1(1) + W(2)\theta_2(1), \theta_{12}(2) = W(1)\theta_1(2) + W(2)\theta_2(2).$$

Если

$$W(1)\theta_1(1) + W(2)\theta_2(1) > W(1)\theta_1(2) + W(2)\theta_2(2),$$

то (например, если $W(1) = 0, W(2) = 1$)

$$S_{12}(1) = W(1)\theta_1(1) + W(2)\theta_2(1), S_{12}(2) = W(1)\theta_1(2) + W(2)\theta_2(2),$$

иначе (например, если $W(1) = 1, W(2) = 0$)

$$S_{12}(1) = W(1)\theta_1(2) + W(2)\theta_2(2), S_{12}(2) = W(1)\theta_1(1) + W(2)\theta_2(1).$$

Для второго сценария получаем

$$S_{12}(1) = W(1)S_1(1) + W(2)S_2(1) = W(1)\theta_1(1) + W(2)\theta_2(2),$$

$$S_{12}(2) = W(1)S_1(2) + W(2)S_2(2) = W(1)\theta_1(2) + W(2)\theta_2(1).$$

Видно, что в общем случае результаты для двух сценариев различны.

Перейдем к рассмотрению случаев с большим количеством агентов – 10 агентов (рис. 1 и рис. 2), 100 агентов (рис. 3 и рис. 4), и 1 млн. агентов (рис. 5 и рис. 6).

Распределение порогов равномерное и случайное, а влиятельности равны $W(1) = W(2) = 0,5$ и $W(3) = \dots = W(n) = 0$. На рисунках показаны представления только первых двух агентов и мнение консенсуса.

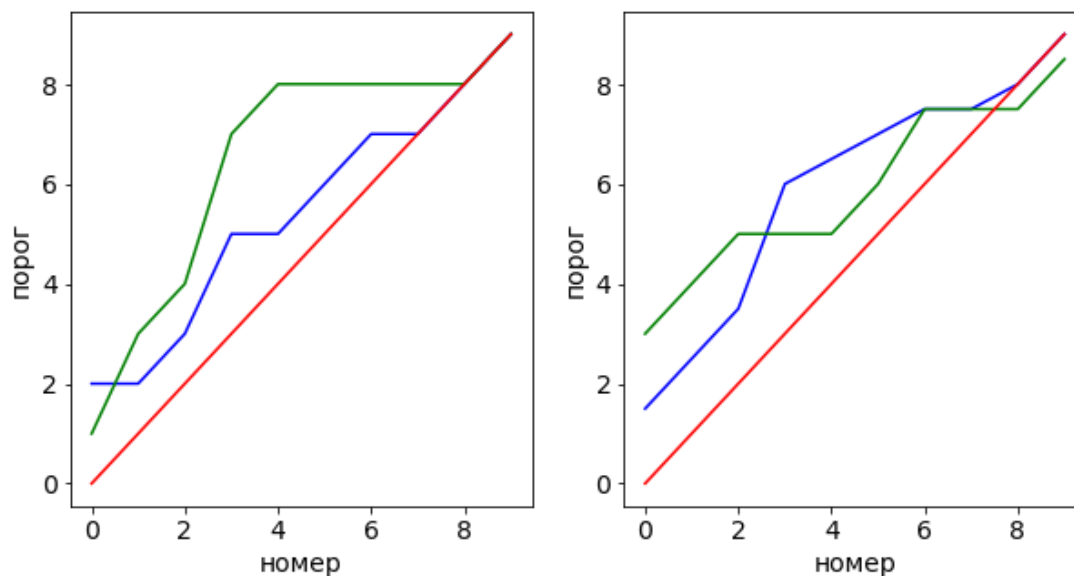


Рис. 1. Графики представлений о порогах для 10 агентов. На графике слева: синяя кривая – представления первого агента, зеленая – второго, красная – биссектриса. На графике справа: синяя кривая – итоговые представления по второму сценарию, зеленая – по первому сценарию, красная – биссектриса

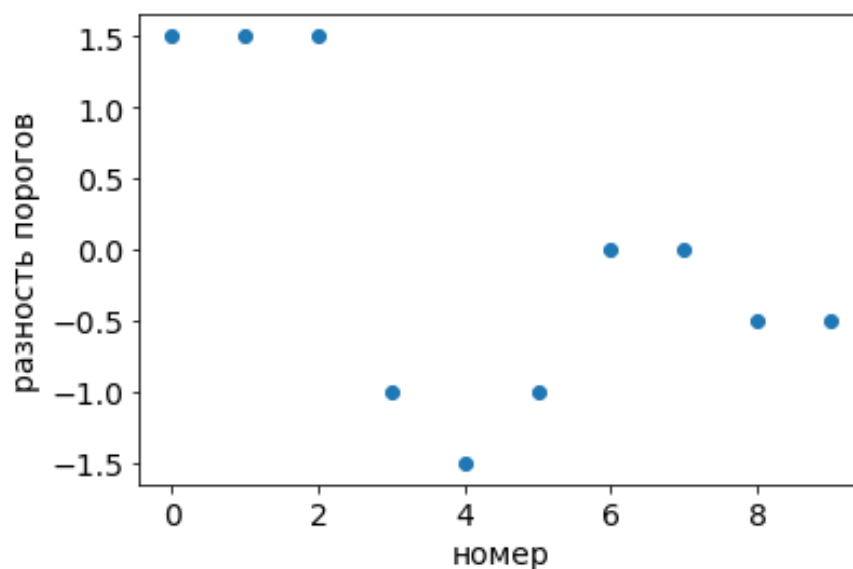


Рис. 2. Разность между значениями упорядоченных порогов между первым и вторым сценарием для 10 агентов

На рисунке для 10-и агентов динамика видна не очень отчетливо – разница между порогами на рис. 2 видна, но может показаться, что это обычно равномерное распределение на отрезке $[-2, 2]$. Однако для большего количества агентов свойства будут видны более отчетливо.

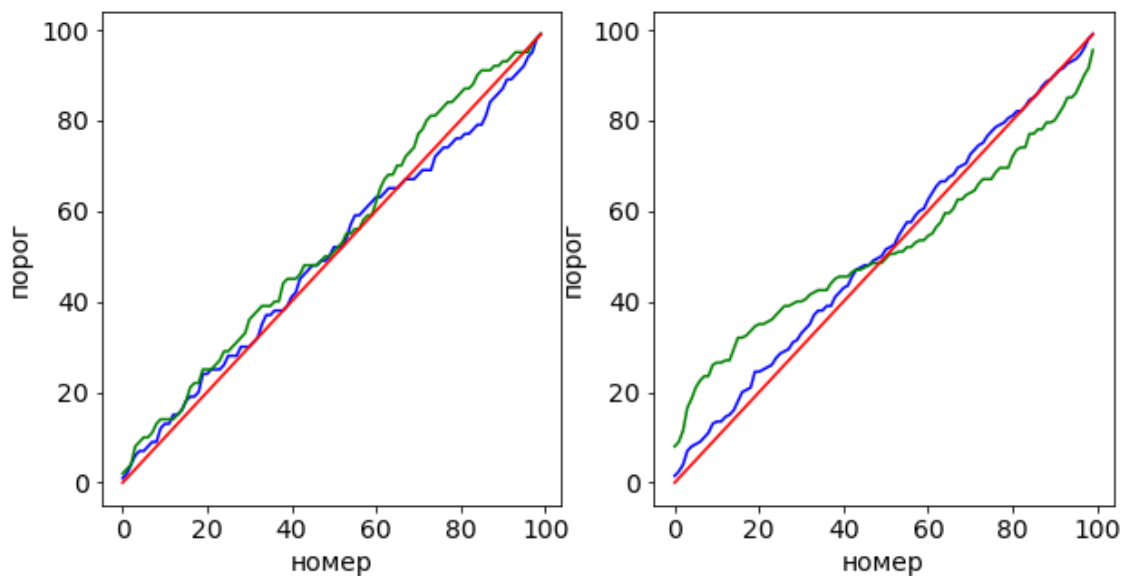


Рис. 3. Графики представлений о порогах для 100 агентов. На графике слева: синяя кривая – представления первого агента, зеленая – второго, красная – биссектриса. На графике справа: синяя кривая – итоговые представления по второму сценарию, зеленая – по первому сценарию, красная – биссектриса

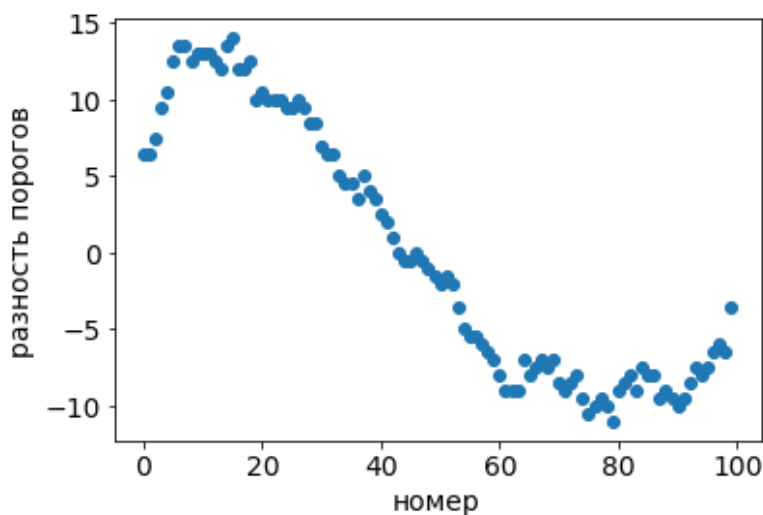


Рис. 4. Разность между значениями упорядоченных порогов между первым и вторым сценарием для 100 агентов

Действительно, для 100 агентов на рис. 4 видно, что разность имеет ясную тенденцию вначале расти, а потом убывать, причем не линейно. Для 1 млн. агентов. Формы кривых на рис. 5 уже выглядят совершенно не случайными, и закономерность уже очевидна. Первый сценарий увеличивает малые пороги и уменьшает большие по сравнению со вторым сценарием. Разность между порогами также становится практически детерминированной кривой. К сожалению, распознать форму кривой пока не получилось.

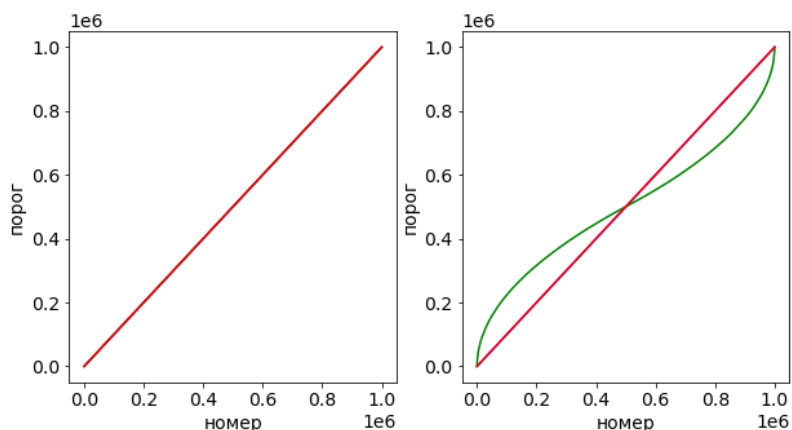


Рис. 5. Графики представлений о порогах для 1 млн. агентов. На графике слева: синяя кривая – представления первого агента, зеленая – второго, красная – биссектриса. На графике справа: синяя кривая – итоговые представления по второму сценарию, зеленая – по первому сценарию, красная – биссектриса

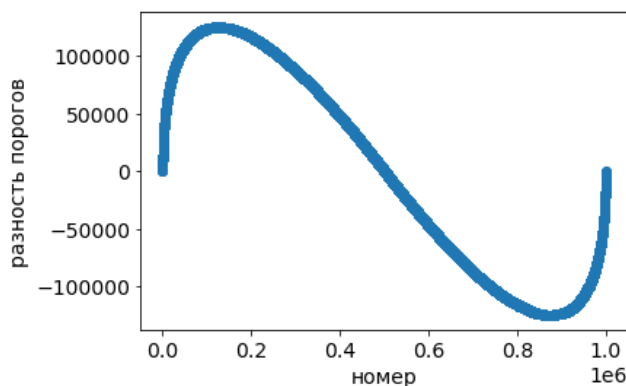


Рис. 6. Разность между значениями упорядоченных порогов между первым и вторым сценарием для 1 млн. агентов

Заключение. Исследование подтвердило то, что в механизмах управления, где консенсус играет вспомогательную роль, крайне важно, что в какой именно форме сформулированы мнения, так как от этого зависит результат. В нашей модели было показано отличие для модели Грановеттера достижения консенсуса по порогам каждого агента, или же достижение консенсуса по функции порогов, упорядоченных по возрастанию.

Библиографический список

1. Granovetter, M. Threshold models of collective behavior // American journal of sociology / M. Granovetter. – University of Chicago. – 1978. – Vol. 83, No. 6. – P. 1420–1443.
2. French, Jr J. R. P. A formal theory of social power / Jr J. R. P. French // Psychological review. American Psychological Association. – 1956. – Vol. 63, No 3. – P. 181–194.

БУДУЩЕЕ КРИПТОВАЛЮТЫ КАК СРЕДСТВА ПЛАТЕЖА В РОССИИ

В.Р. Фейзов

Статья посвящена вопросу регулирования сферы цифровых финансовых активов. Рассмотрены иностранные практики регулирования. Приведена схема функционирования кастодиальных сервисов. Предложен вариант реализации использования криптовалюты как средства платежа в Российской Федерации.

Ключевые слова: криптовалюта, стейблкоин, финансы, экономика, средство платежа, государственное регулирование, кастодиан.

В 2008 году Сатоши Накамото представил концепт одноранговой электронной денежной системы, которая позволяет совершать транзакции между участниками напрямую, минуя любые финансовые институты [1]. Именно благодаря этому концепту решилась проблема двойных трат без участия доверенного лица, что в итоге привело к созданию первой криптовалюты под названием биткоин. Особенностью такого рода цифрового финансового актива является технология блокчейн, позволяющая децентрализованно учитывать и хранить все транзакции сети в открытом виде.

В соответствии с экономической теорией, деньги имеют четыре основных функции [2]:

- функция средства обращения;
- деньги как средство сохранения стоимости;
- единица счета (мера стоимости);
- средство платежа.

Не смотря на контролируруемую системой сложность добычи монет, биткоин вряд ли может быть классифицирован как деньги со свойством средства платежа или как средство сохранения стоимости, ввиду его цифровой природы, а также волатильности курса. При этом стоит учесть, что в изначально предложенной концепции криптовалюта описывалась именно как средство платежа. Кроме того, такие функции как мера стоимости и средство обращения становятся более свойственны для криптовалюты, в связи с постепенным принятием криптовалюты институциональными участниками финансовых рынков и бизнес-структурами.

С момента создания первой криптовалюты сфера развивалась и продолжает развиваться, появилось как множество вариаций

криптоактивов, так и рабочих мест в организациях, связанных с этой областью. Важнейшим витком развития криптовалюты является создание стейблкоинов в 2015 году. Стейблкоины представляют собой определенный класс цифровых валют, курс которых привязан к какому-либо иному активу или группе активов. Классифицировать данный класс цифровых валют можно на 3 основных вида - алгоритмические, обеспеченные физическими активами или цифровыми валютами. Алгоритмические стейблкоины являются наименее устойчивыми и часто теряют привязку к базовому активу из-за несовершенства самого алгоритма или из-за определенных действий участников рынка. Стейблкоины обеспеченные физическими (валюта, металлы, ценные бумаги) или цифровыми валютами являются наиболее перспективными в контексте средства платежа и средства сохранения стоимости, так как привязка к базовому активу позволяет минимизировать волатильность. Обеспеченные физическими активами стейблкоины имеют схожие черты с деньгами времен золотого стандарта, так как их эмиссия осуществляется в соответствии с количеством обеспечения в виде базового актива.

Для того чтобы какая-либо валюта получила признание в виде средства платежа должны быть выполнены два условия. Первое: валюта должна пользоваться всеобщим признанием в качестве денег с соответствующими свойствами. Второе: необходимо разрешение от государства на выполнение этой функции, поскольку только государство может обязать других субъектов экономики принимать определенные знаки в качестве денег, в противном случае государство определяет валюту денежным суррогатом или частными деньгами. Общемировая тенденция принятия цифровых валют способствует постепенному выполнению первого условия, относительно второго условия существует неопределенность, связанная с тем, что регулирование сферы цифровых валют в странах отличается.

В 2021 году вступил в силу Федеральный закон от 22.07.2020 № 259-ФЗ «О цифровых финансовых активах, цифровой валюте и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [3]. На основании закона за Центральным банком РФ устанавливается право изменять требования в отношении участников рынка криптовалют, вести реестры операторов информационной системы и операторов обмена цифровыми финансовыми активами. При этом в соответствии с законопроектом № 138674-8 в Федеральный закон «О банках и банковской деятельности» от 02.12.1990 N 395-1 вводится запрет на передачу или прием цифровых валют и финансовых активов в качестве встречного представления за передаваемые товары, выполняемые работы, оказываемые услуги и в качестве других способов оплаты. Не смотря на подготовку правовой базы для осуществления деятельности обменников и

бирж и одновременный запрет на использование криптовалюты в качестве средства платежа, использование криптовалюты в качестве оплаты внешнеторговой деятельности не запрещается.

На фоне соответствующих изменений в законодательстве Российской Федерации опыт регулирования в других странах представляет значительный интерес.

Служба по надзору за финансовыми рынками Швейцарии подразделяет всю криптовалюту на четыре вида: служебные, имущественные и платежные или смешанные токены. Служебные токены могут быть обменяны на услуги или продукты в какой-либо экосистеме, имущественные токены определены как ценные бумаги. Платежные токены представляют собой классические криптовалюты, токен такого вида можно использовать для расчетов в сделках, если это было оговорено заранее. Смешанные токены содержат черты разных токенов, например, токен-актив и имущественный токен с функциями платежного токена. В таком случае токены считаются как ценной бумагой, так и средством платежа. В целях налогообложения криптовалюта рассматривается в качестве законного платежного средства в том смысле, что любые операции по купле-продаже или обмену криптовалюты освобождены от налога на добавленную стоимость [4].

В конце августа 2013 года Министерство финансов ФРГ сделало заявление о том, что биткойн не может быть классифицирован как электронная или иностранная валюта, а больше подходит под определение частные деньги, с помощью которых могут осуществляться многосторонние клиринговые операции, при этом криптовалюта определяется как эквивалент законных платежных средств, а криптовалютные транзакции позиционируются как основанный на договоре альтернативный способ оплаты [5].

Поскольку криптовалюты не являются законным платежным средством, «платежные счета», то есть электронные кошельки (горячие или холодные), в которых «хранятся» соответствующие ключи, не являются платежными счетами в соответствии законом о надзоре за платежными услугами.

В 2013 году судья Восточного округа штата Техас (США) принял решение относительно трактовки криптовалюты. Поскольку биткойны можно использовать в качестве денег для оплаты за товары или обменять на обычные валюты, такие как доллар США, евро, иена или юань, то биткойн является валютой или формой денег [6].

Менее успешным, но наиболее интересным является опыт государства Сальвадор. Биткойн стал официальным платежным средством в стране в соответствии с «Законом о биткойнах», который был принят в 2021 году. Правительство спонсировало кошелек под названием Chivo, в котором

зарегистрировали всех граждан страны. При регистрации каждому пользователю полагалось вознаграждение в 30\$ в биткоин эквиваленте. Тем не менее, неудачным пример считается в связи с тем, что Сальвадор разместил в биткоине государственные резервы на сумму в 31 миллион долларов, в результате волатильности эта сумма уменьшилась в 2 раза [7].

Для реализации криптовалютных платежей на территории Российской Федерации предлагается использовать кастодиальные сервисы.

Кастодиан сервис в финансовой среде – это учреждение, осуществляющее хранение ценных бумаг и иных финансовых активов клиентов, а также управление этими ценными бумагами. Кроме того, кастодиан может предоставлять такие услуги, как клиринг и расчеты по сделкам, валютные операции, операции займа ценных бумаг.



Рис. 1. Схема функционирования кастодиан сервиса

На рис. 1 приведена схема функционирования кастодиан сервиса для участников товарно-денежных отношений. Крипто кастодиан организация получает лицензию у соответствующего регулирующего органа, вследствие чего выстраивает инфраструктуру для предоставления услуг.

Реализуется хранение средств клиентов на кошельках программного или аппаратного вида в зависимости от запросов клиентов сервиса.

Уполномоченный орган помимо лицензирования обязан вести реестр кастодиан организаций и проводить их аудит. Бизнес, желающий принимать в виде оплаты криптовалюту, обращается с соответствующим запросом к лицензированной организации, подписав договор об оказании услуг и пройдя соответствующие мероприятия по идентификации (KYC), предприятию в соответствии с запросом предоставляются кошельки и формируются QR-коды для осуществления переводов. Клиент, предварительно зарегистрированный у сервиса и обладающий криптовалютой в соответствующем кошельке, осуществляет перевод сканируя QR-код, в последствии осуществляется транзакция. После подтверждения перевода клиент получает свой товар. Предоставление налоговой информации сервисов поможет избежать вероятность сокрытия доходов бизнеса.

Для цифровых финансовых активов проблема сохранности токенов является одной из самых сложных. Плюсами кастодиальных сервисов по хранению криптовалюты является доступность населению и бизнесу, так как все техническое обеспечение берет на себя сервис. Стоит также отметить, что к сервису легче выработать универсальную регуляторную базу в виде лицензирования и аудита, что упростит контроль за выполнением требований, что в свою очередь снижает глобальные риски и для экономики и денежно-кредитной политики.

В Швейцарии кастодиальные услуги (размещение активов и управление ими) для институциональных и частных инвесторов оказывают банки и коммерческие компании. В качестве дополнительной возможности биржи и торговые брокеры предлагают хранение криптоактивов. На территории страны разрешено оплачивать налоги и платить за коммунальные услуги в биткоине.

Заключение. Основные угрозы от использования криптовалюты исходят от ее анонимности, иными словами, затруднительно определить владельца кошелька. Обязательное выполнение требований KYC для клиентов кастодиального сервиса позволит снизить угрозы связанные с анонимностью, так как к использованию сервиса будут допущены только пользователи прошедшую полную верификацию. Кроме того, в регуляторных требованиях для сервисов возможно ввести список разрешенных для использования криптовалют, что также поможет снизить риски неправомерного использования цифровых валют активов.

При выборе криптовалюты в качестве средства платежа наиболее целесообразно использовать стейблкоины, так как их курс менее волатилен, что позволит снизить уровень неопределенности в

использовании криптовалюты и уменьшить вероятность потери средств граждан.

Проблема хищения криптовалюты связанная с неопытностью пользователей будет уменьшена, так как обеспечение безопасности средств будет возлагаться на кастодиан сервисы.

Библиографический список

1. Nakamoto, S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system / S. Nakamoto // *Decentralized Business Review*. – 2008. – P. 21260.

2. Миллер, Р. Л. Современные деньги и банковское дело / Р. Л. Миллер, Д. Д. Ван-Хуз. – М.: Инфра-М, 2000. – 856 с.

3. Федеральный закон от 22.07.2020 № 259-ФЗ «О цифровых финансовых активах, цифровой валюте и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

4. Лифшиц, И.М. Правовое регулирование криптоактивов в Швейцарии / И.М. Лифшиц, А.В. Лосева // *Международное право*. – 2020. – № 4. – С. 1–10.

5. Печегин, Д.А. К вопросу о правовом регулировании криптовалют в Германии / Д.А. Печегин // *Журнал зарубежного законодательства и сравнительного правоведения*. – 2019. – №. 6. – С. 21–33.

6. Елохова, И.В. Подходы к определению правового статуса криптовалют в ведущих странах мира / И.В. Елохова, М.И. Ахметова, А.В. Крутова, А.В. Тетенова // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки*. – 2019. – №. 1. – С. 201–209.

7. Oxford Analytica El Salvador bitcoin experiment comes with risks [Электронный ресурс] // *Emerald Expert Briefings*. – 2021. – №. oхан-db. Дата обновления: 15.06.2022. – URL: <https://doi.org/10.1108/OXAN-ES270852> (дата обращения: 01.07.2022).

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БАНКРОТСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

А.М. Чугайнова

Проведен анализ текущего состояния строительной отрасли с приведением статистических данных по объему строящегося жилья и проблемных домов. Рассматривается задача поиска финансовых паттернов. Показан алгоритм идентификации финансовых паттернов на примере выявления правила, при котором строительная организация обанкротится и правило, при котором организация продолжит свою деятельность.

Ключевые слова: несостоятельность застройщиков, прогнозирование банкротства, механизмы комплексного оценивания, анализ данных, финансовые паттерны.

Современной эпохе все более свойственны учащающиеся финансовые кризисы, наложения запретов, рост информационных данных. С каждым годом усиливаются общественные волнения, политическая напряженность, нестабильность в экономической сфере. Как опытные ведущие корпорации, так и малый развивающийся бизнес зачастую не способны повлиять на сложившееся положение, что, собственно, ведет к гибели организаций.

Строительство играет важную роль в развитии не только производственной, но и непроизводственной сферы. Состояние строительной отрасли является индикатором экономической активности, поэтому важно следить за ее нормальным функционированием. Для этого государство должно способствовать созданию благоприятных условий для ведения строительной деятельности застройщиками и не допускать кризисных ситуаций.

По итогам заседания Президиума Государственного Совета, посвященному стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (далее — Стратегия), которое состоялось 21 июня 2022 года, Президентом РФ отмечается необходимость ежегодного наращивания темпов жилого строительства: «В прошлом году в сложных обстоятельствах пандемии наши строители сработали без всякого преувеличения ударно: было введено более 92 миллионов квадратных метров жилья. В целом необходимо обеспечить объем ввода жилья в этом году не ниже уровня прошлого года, а прирост ипотечного портфеля не менее чем на 2,5 триллиона рублей». Вместе с тем Президентом поставлена задача

сокращения числа объектов незавершенного строительства и «завершения строительства ранее замороженных объектов за полтора–два года».

В целях контроля реализации установленных целей на заседании обсуждался Проект Стратегии, содержащий целевые показатели и перечень мероприятий для их достижения. Например, для обеспечения доступности приобретения, строительства или аренды жилья, для не менее чем 2/3 граждан страны, необходимо не только развитие рынка ипотечного кредитования и совершенствование законодательного регулирования, но и применение типовых проектов, взаимная увязка мероприятий разных национальных проектов, кадровое обеспечение отрасли посредством гарантированного спроса на мигрантов. В рамках развития промышленного строительства требуется обеспечение перехода экономики государства от экспортносырьевого типа развития к инновационному типу развития.

Применение новых подходов и технологий, непрерывное совершенствование мероприятий, направленных на стабилизацию и развитие как промышленного, так и гражданского строительства, позволяет сделать вывод о том, что строительную отрасль России ожидают колоссальные изменения.

Действительно, анализируя динамику ввода жилья застройщиками в России в 2020 — 2022 годах (рис. 1) замечаем увеличение объемов ввода жилья за 6 месяцев 2022 года на 21,6% к уровню 2021 года и превышение на 44,9% к 2020 году, что говорит об эффективном регулировании государством строительного комплекса несмотря на сложные экономические ситуации.

Тем не менее, проблема нарушения сроков завершения строительства и банкротства застройщиков остается актуальной. Проводя анализ данных Единого реестра проблемных объектов⁴ на август 2022 года конкурсное производство открыто в отношении 450 специализированных застройщиков, на которых приходится 7 млн. кв.м недостроенной жилой площади или 1 085 недостроенных домов (табл. 1). Большая часть несостоятельных застройщиков, находящихся в процедуре банкротства или имеющих записи в реестре проблемных домов, зарегистрирована в Московской области (15,9%), Краснодарском крае (9,0%), Ленинградской области (6,4%) (см. табл. 1).

⁴ <https://наш.дом.пф/>

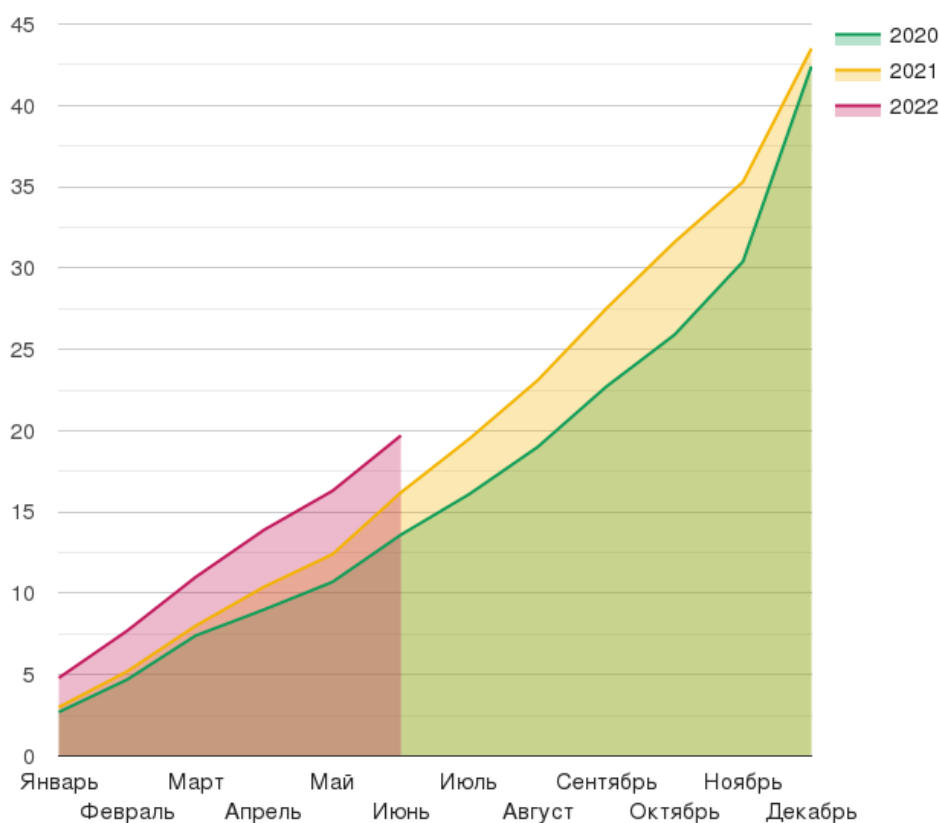


Рис. 1. Ввод жилья застройщиками в Российской Федерации накопленным итогом по годам в 2020 — 2022 гг., млн кв.м

Таблица 1

Фрагмент статистических данных реестра проблемных домов

Характеристика	Количество застройщиков	Количество домов	Жилая площадь, тыс. кв.м
Открыто конкурсное производство	450	1 085	7 000
Введена иная процедура банкротства	14	111	313
Нарушены сроки завершения строительства более чем на 6 месяцев	156	426	2 626
Нарушены сроки передачи объекта долевого строительства более чем на 6 месяцев	93	185	1 495
Общий итог: <i>в том числе в разрезе по регионам:</i>	692*	1 807	11 434
1. Московская область	110	558	2 507
2. Краснодарский край	62	126	1 192
3. Ленинградская область	44	141	1 199
4. Новосибирская область	33	66	481
5. Республика Башкортостан	32	80	410

Продолжение таблицы 1

6. Красноярский край	25	92	563
7. Ростовская область	21	46	217
8. Челябинская область	20	41	236

Анализ кризисного состояния организаций важен и необходим при сохранении и укреплении внешней и внутренней экономик страны. Целью настоящего исследования является демонстрация возможности выявления финансовых закономерностей на основе годового бухгалтерского отчета. Научная новизна исследования состоит в идентификации ряда новых признаков финансовой несостоятельности застройщиков, определяющих отраслевую особенность строительной деятельности, которые в комплексе позволяют с большей степенью достоверности определять финансовое положение застройщиков.

Теоретическую основу настоящего исследования составляют результаты работы, предоставленные [1], в которой был проведен анализ структуры двухсот бухгалтерских балансов строительных организаций и определены диапазоны статей баланса, характерные для категорий финансового состояния (табл. 2).

Таблица 2

Критерии отнесения наиболее значимых статей баланса к определенной категории финансового состояния

Статья баланса	Кодирование статьи баланса	Признак банкрота, кодируется как 1	Признак организации с финансовыми сложностями, кодируется как 2	Признак состоятельной организации, кодируется как 3
Основные средства	О	до 13%	От 13% до 39%	от 39%
Запасы	З	от 55%	От 40% до 55%	До 40%
Дебиторская задолженность	Д	до 40% или свыше 89%	От 30% до 50%	Остальные значения
Нераспределенная прибыль (непокрытый убыток)	Н	До -22%	От -22% до 26%	От 26%
Кредиторская задолженность	К	От 99%	От 74% до 99%	до 74%

Далее, путем применения общенаучных методов исследования как на теоретическом уровне, так и на экспериментальном уровне, а также метода идентификации механизмов комплексного оценивания (далее – МКО) на

основе обучающего множества с применением системно-когнитивного анализа автором разработана модель прогнозирования банкротства предприятий строительной отрасли, использующая в качестве комплексных оценок две категории: или «банкрот» (код «б»), или «действующая организация» (код «д»), опираясь на юридический статус организации. Это отличает настоящее исследование от [2, 3], где в числе комплексных оценок было пограничное финансовое состояние «серая зона».

Рассмотрим пример МКО, идентифицированного с помощью метода [4] в структуре ОНЗКД, с последовательной структурой дерева критериев, где каждому листу дерева соответствует определенная статья баланса, и покажем процесс выявления паттернов относительно финансового состояния строительных организаций (рис. 2).

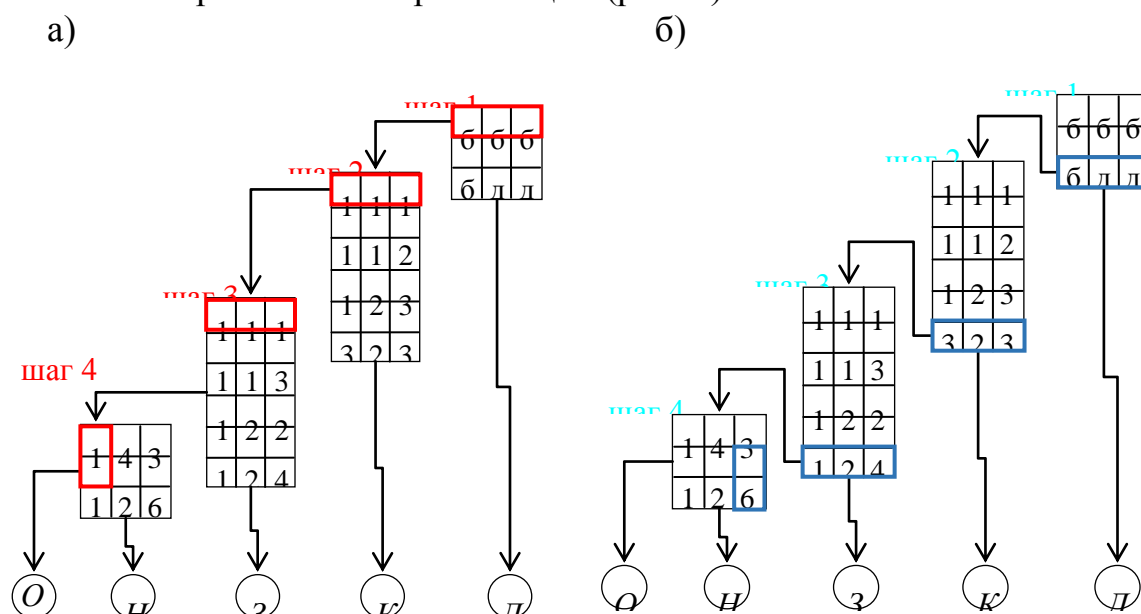


Рис. 2. Алгоритм поиска финансовых паттернов а) банкротства и б) платежеспособных организаций в данных, структурированных в виде МКО со структурой ОНЗКД

В приведенном примере (см. рис. 2) первая матрица описывает свертку признаков «Основные средства» (О) и «Нераспределенная прибыль (непокрытый убыток)» (Н). С помощью первой матрицы и прибавлении признака «Запасы» (З) формируется вторая матрица. Третья матрица соответствует свертке агрегированных признаков на предыдущем уровне и признаку «Кредиторская задолженность» (К). Последняя (четвертая) матрица учитывает оставшийся признак – «Дебиторская задолженность» (Д).

Сформулируем первый паттерн о вероятности наступления банкротства (рис. 2а).

В матрице 4-го уровня следует выделить 1-ю строку (шаг 1, см. рис. 2а), где все элементы имеют код «б», т.е. организации обанкротились вне зависимости от признака Д (дебиторская задолженность). Другими словами, при условии, что в матрице 3-го уровня стоит оценка 1, определяющая 1-ю строку в матрице 4-го уровня, то при любой дебиторской задолженности организация является финансово несостоятельной. В матрице 3-го уровня, в свою очередь, также можно выделить правило, при котором результат будет давать оценку 1, но уже вне зависимости от признака К (кредиторская задолженность) – 1-я строка (шаг 2, см. рис. 2а). Тогда в матрице свертки «ОНЗ» надо выделить элементы, принимающие значение 1, в данном примере следует выделить также 1-ю строку (шаг 3, см. рис. 2а), согласно которой признак З (запасы) может быть любым. В матрице нижнего уровня значение 1 встречается в 1-ой и во 2-ой строках 1-го столбца (шаг 4, см. рис. 2а), где 1-ый столбец означает, что признак Н (нераспределенная прибыль (непокрытый убыток)) равен 1, т.е. доля непокрытого убытка превышает 22% баланса организации, а 1-я и во 2-я строки соответствуют тому, что признак О (основные средства) не равен 3, что согласно критериям (см. табл. 2) обеспечивается тогда, когда доля основных средств занимает в структуре баланса до 39%.

Аналогичные рассуждения могут быть построены относительно действующих организаций (рис. 2б). Например, в верхней матрице видно, что если результат предыдущего агрегирования равен 3, то при любых значениях критерия Д (дебиторская задолженность) организация оценивается как «д», т.е. действующая организация (шаг 1, см. рис. 2б). В матрице «ОНЗК» оценка 3, в свою очередь, встречается, довольно часто, но можно выделить нижнюю 6-ю строку (шаг 2, см. рис. 2б), где все значения принимают именно 3 вне зависимости от признака К (кредиторская задолженность). Таким образом, если в матрице 2-го уровня «ОНЗ» получается 6, то организация будет иметь оценку 3 в матрице «ОНЗК», а, как было показано ранее, она не чувствительна к признаку К. Тогда в матрице 2-го уровня «ОНЗ» выделим 6-ю строку (шаг 3, см. рис. 2б), поскольку оценки равны 6 вне зависимости от признака З (запасы). На последнем этапе (шаг 4, см. рис. 2б) остается определить сочетание оставшихся двух признаков О (основные средства) и Н (нераспределенная прибыль (непокрытый убыток)), при которых в матрице нижнего уровня получается свертка, равная 6. Это достигается при условии $O \neq 1$ и $H = 3$, что согласно критериям (см. табл. 2) обеспечивается тогда, когда доля основных средств превышает 13%, а доля нераспределенной прибыли превышает 26%.

Заключение. Путем анализа данных, структурированных в виде МКО со структурой дерева критериев ОНЗКД, были найдены два финансовых

паттерна, которые можно использовать при финансовом анализе бухгалтерских балансов.

Строительная организация вне зависимости от размеров дебиторской и кредиторской задолженностей и вне зависимости от имеющихся у организации запасов:

1) много вероятно обанкротится, если доля основных средств занимает в структуре баланса до 39% и доля непокрытого убытка превышает 22% всего баланса;

2) много вероятно не обанкротится, если доля основных средства превышает 13% и доля нераспределенной прибыли превышает 26% всего баланса.

В заключение стоит отметить, что при пяти исследуемых статей баланса возможны 105 альтернативных структур деревьев критериев в виде полных бинарных графов с поименными листьями, из которых 60 графов с последовательной структурой свертки и 45 графов с непоследовательной. Матрицы свертки во всех структурах различны, что позволяет выделять уникальные правила прогнозирования банкротства, которые можно считать финансовыми паттернами. В результате исследования 60 графов с последовательной структурой было замечено, что во многих случаях паттерны либо повторяются, либо расширяют правила. Все обнаруженные паттерны в настоящей работе не приведены в силу ограниченного объема работы.

Библиографический список

1. Носкова, А.Р. Исследование достоверности прогнозирования банкротства при введении новой категории финансового состояния предприятий / А.Р. Носкова, А.О. Алексеев // Прикладная математика и вопросы управления. – 2020 – № 3 – С. 105–122. – DOI: 10.15593/2499-9873/2020.3.06.

2. Alekseev, A.O. Identification of integrated rating mechanisms based on training set with non-serial tree criteria structures / A.O. Alekseev // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). 10–12 November 2021, Lipetsk, Russia, IEEE, 2021. In press.

3. Сергеев, В.А. Идентификация механизмов комплексного оценивания как подход анализу дискретных данных / В.А. Сергеев, Н.А. Коргин. – текст : электронный // Управление большими системами: доклады XVII Всероссийской школы-конференции молодых ученых / Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – URL: <https://ubs2021.ipu.ru/node/13279> (дата обращения 01.08.2022).

4. Alekseev, A.O. Identification of integrated rating mechanisms based on training set / A.O. Alekseev // 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). 11–13 November 2020, Lipetsk, Russia, IEEE, 2020. – P. 398–403.

СЦЕНАРНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ РЕГИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

А.А. Широкий, А.В. Федяева, А.М. Исянова

В работе обсуждается один из возможных подходов к управлению региональной системой здравоохранения в части организации оказания медицинской помощи при онкологических заболеваниях и заболеваниях сердечно-сосудистой системы. Выявлены ключевые показатели результативности оказания медицинской помощи при заболеваниях этих классов. Построены карты их взаимного влияния, позволяющие при дополнении их факторами влияния строить прогнозные модели для тестирования управляющих воздействий на основе сценарного подхода.

Ключевые слова: региональное здравоохранение, управление здравоохранением, прогнозные модели, сценарии.

Введение

Система здравоохранения является крайне сложным объектом управления. В настоящий момент среди исследователей в этой области нет даже общего понимания того, на каких принципах эта система должна быть построена. В разных странах используются настолько различные системы (актуальный обзор систем здравоохранения стран ОЭСР можно найти в [1]), что даже перенос лучших практик оказывается невозможным — инструменты, хорошо работающие, к примеру, в страховой системе здравоохранения, оказываются неприменимы в системе с государственным обеспечением.

В связи с этим важной задачей является разработка научно обоснованных подходов к оцениванию систем здравоохранения различного уровня, а также инструментов прогнозирования их развития в условиях постоянно изменяющихся внутренних и внешних параметров. При этом даже базовая проблема планирования объемов медицинской помощи решена лишь отчасти (см., например, [2]).

Поскольку предметная область является сложно формализуемой, в качестве основы для построения модели был выбран аппарат взвешенных ориентированных графов. Объектом исследования являются региональные системы здравоохранения в части организации оказания медицинской помощи при заболеваниях сердечно-сосудистой системы (ССС) и онкологических заболеваниях. Эти две нозологические группы были выбраны потому, что лидируют среди причин смертности ([3, 4]). Предметом исследования являются ключевые показатели состояния региональной системы здравоохранения.

Целью работы является формирование перечня ключевых показателей состояния региональной системы здравоохранения в части организации медицинской помощи при заболеваниях сердечно-сосудистой системы, а также онкологических заболеваниях.

Материалы и методы

Определять ключевые показатели оценивания системы регионального здравоохранения можно различными способами. Достаточно естественным представляется воспользоваться действующими нормативными документами, регламентирующими различные аспекты оказания медицинской помощи. В то же время анализ этих документов показал, что в качестве оцениваемых показателей в них выступают в первую очередь показатели эффективности расходования средств. По мнению авторов, такая оценка не отражает в полной мере сложность рассматриваемого объекта управления и, главное, не соответствует главной задаче здравоохранения — повышению продолжительности качественной жизни населения.

В связи с этим мы опросили ряд экспертов, занимающих позиции на различных уровнях иерархии КД по организации здравоохранения. Вопросы, адресованные экспертам в первой фазе опроса, звучали следующим образом:

1. Назовите, пожалуйста, ключевые количественные показатели, которые, по Вашему мнению, следует применять для оценки состояния системы здравоохранения в части организации медицинской помощи при [онкологических заболеваниях / заболеваниях сердечно-сосудистой системы].

2. Перечислите, пожалуйста, показатели, которые используются сегодня, однако, по Вашему мнению, не несут важной информации об организации медицинской помощи при [онкологических заболеваниях / заболеваниях сердечно-сосудистой системы]. Если таковых нет, оставьте поле ответа пустым.

Всего на запрос откликнулись 10 экспертов в области организации здравоохранения, из них 6 дали ответы в части, относящейся к лечению онкологических заболеваний и 5 — в части, относящейся к лечению заболеваний ССС.

Во второй фазе мы попросили экспертов оценить важность конкретных показателей из списка, сформированного по завершении первой фазы, в порядковой шкале от 0 до 3 баллов, где 0 означает, что показатель можно не учитывать, а 3 — что показатель критически важен и является ключевым. На этом этапе к работе подключились дополнительные эксперты — их было по 10 в каждой из двух групп. По завершении опроса показатели были ранжированы по числу оценок «3», затем по числу оценок «2» и так далее. В качестве ключевых показателей состояния

региональной системы здравоохранения в части оказания медицинской помощи при онкологических заболеваниях были отобраны те, у которых оценка «3» оказалась доминирующей (то есть, ее поставило большее число экспертов, чем любую другую). Среди показателей, относящихся к оказанию помощи при заболеваниях сердечно-сосудистой системы, таковой оказался всего один, поэтому критерием отбора было принято доминирование оценки «2» над «3» с долей 0,6 или меньше.

Наконец, в третьей фазе мы обратились к экспертам с просьбой оценить направление и силу взаимного влияния показателей друг на друга в смысле изменения их значений. Эта задача оказалась достаточно сложной для экспертов — данные были предоставлены девятью и семью экспертами в группах «онкологов» и «кардиологов» соответственно. На основании мнений экспертов были построены знаковые когнитивные карты, описывающие взаимосвязь между ключевыми показателями. Описание примененной процедуры согласования мнений экспертов можно найти в [5].

Результаты и обсуждение

По итогам первой фазы эксперты назвали соответственно 16 («онкологи») и 22 («кардиологи») показателя оценивания состояния региональной системы здравоохранения в следующих четырех группах:

- результативность деятельности по организации здравоохранения;
- обеспеченность специализированными кадровыми ресурсами;
- обеспеченность материальными ресурсами;
- качество маршрутизации пациентов.

Распределение показателей по группам приведено в табл. 1.

Таблица 1

Распределение названных экспертами показателей оценивания состояния региональной системы здравоохранения по группам

Группа	Число показателей состояния региональной системы оказания медицинской помощи при	
	онкологических заболеваниях	заболеваниях сердечно-сосудистой системы
Результативность деятельности по организации здравоохранения	7	6
Обеспеченность специализированными кадровыми ресурсами	2	3
Обеспеченность материальными ресурсами	4	5
Качество маршрутизации пациентов	3	8
Всего	16	22

Отметим, что предложенные экспертами формулировки наименований показателей различались, синонимические конструкторы были объединены авторами. Данные в табл. 1 приведены уже после объединения.

Таблица 2

Отобранные ключевые показатели оценивания состояния региональной системы здравоохранения

* — показатели, добавленные на второй фазе исследования

Наименование показателя, обозначение (в скобках)	Число экспертов, поставивших оценку				Доля доминирующей оценки
	3	2	1	0	
Показатели оказания медицинской помощи при онкологических заболеваниях					
Доля заболеваний на ранних стадиях среди впервые поставленных диагнозов (ED)	10	0	0	0	1
Обеспеченность диагностическим оборудованием (E)	9	0	1	0	0,9
Средняя продолжительность ожидания приема врача-онколога в поликлинике по записи (W)	7	2	1	0	0,7
Информированность населения о ранних симптомах заболевания* (IS)	6	4	0	0	0,6
Информированность населения о факторах риска* (IR)	5	5	0	0	0,5
Медианный уровень квалификации профильных специалистов (Q)	5	4	1	0	0,5
Количество коек в онкологических отделениях больниц в расчете на 10 000 чел. населения (B)	5	3	2	0	0,5
Показатели оказания медицинской помощи при заболеваниях сердечно-сосудистой системы					
Доступность скорой медицинской помощи (ER)	7	2	1	0	0,7
Уровень доступности специализированной медицинской помощи (ES)	4	6	0	0	0,6
Повозрастные показатели смертности по причине сердечно-сосудистых заболеваний (D)	4	6	0	0	0,6
Наличие оборудования (E)	4	5	1	0	0,5
Медицинская активность пациентов* (A)	4	5	1	0	0,5
Доступность высокотехнологичной медицинской помощи (H)	4	5	0	1	0,5
Доверие пациентов системе здравоохранения* (T)	4	5	0	1	0,5

Также следует отметить разницу в разбросе мнений экспертов в рассматриваемых двух областях. В частности, показателей, названных более чем одним экспертом, оказалось 11 для группы «онкологов» и всего

8 для группы «кардиологов». Тремя или более экспертами были названы по 4 показателя в каждой из групп.

Во второй фазе исследования экспертам предлагался расширенный список показателей. Для группы «онкологов» к 16 названным ими в ходе выполнения первой фазы показателям было добавлено 6, которые ни один эксперт ранее не упоминал. Для группы «кардиологов» к ранее названным 22 были добавлены еще 5 неназванных ранее показателей. Мы просили экспертов оценить каждый из предложенных показателей по следующей четырехбалльной шкале:

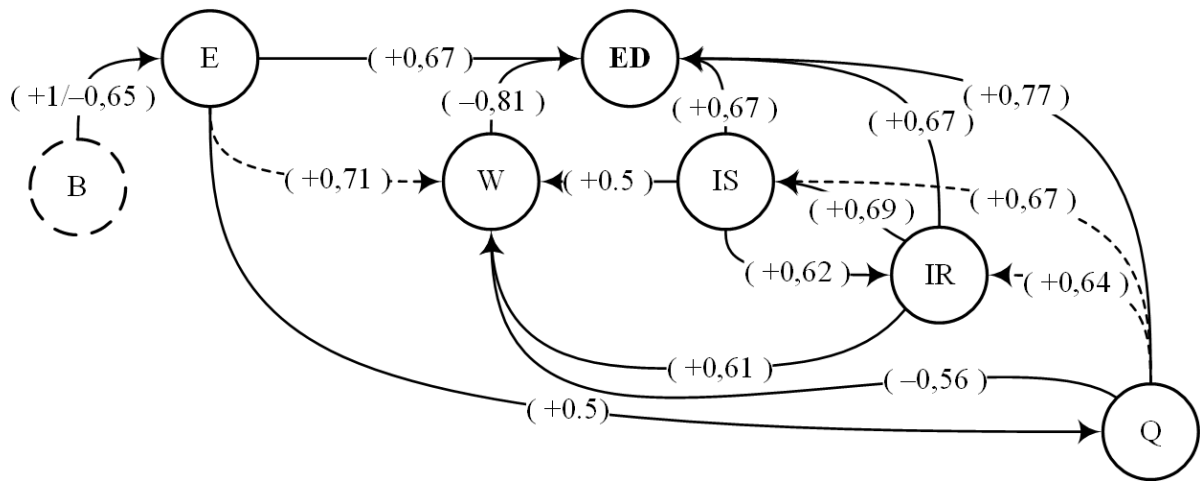
- 0 — показатель совершенно не важен / не применим;
- 1 — второстепенный показатель с низкой важностью;
- 2 — умеренно важный показатель;
- 3 — критически важный, ключевой показатель.

После проведения описанной в предыдущем параграфе процедуры ранжирования нами было отобрано по 7 ключевых показателей, характеризующих систему оказания медицинской помощи по рассматриваемым группам заболеваний. При этом в каждой группе среди ключевых оказалось по два показателя, не названные экспертами в первой фазе исследования (см. табл. 2).

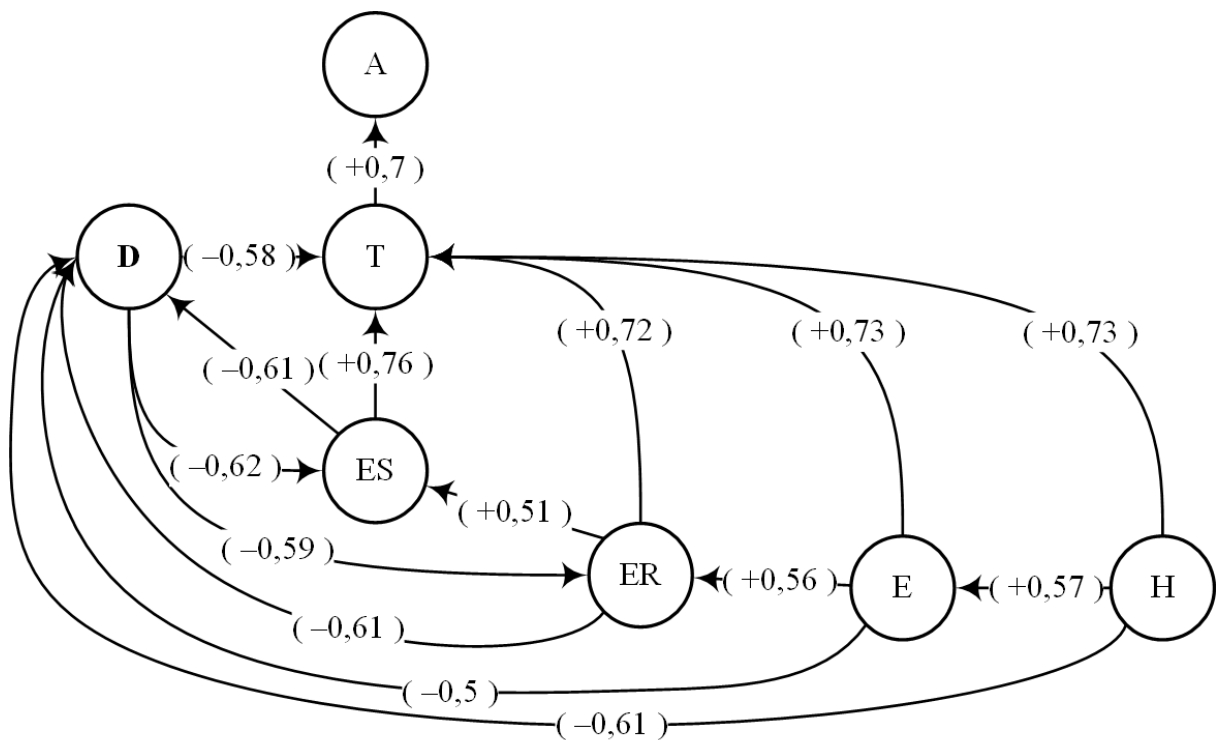
В третьей фазе эксперты оценивали направление и силу взаимного влияния показателей друг на друга. После согласования мнений экспертов нам удалось построить карты их взаимного влияния. Они изображены на рис. 1.

Полужирным шрифтом обозначены показатели, которые могут рассматриваться в качестве целевых. Пунктирные линии обозначают информационные связи, то есть такие, которые должны быть по мнению экспертов, но не реализуются в текущей системе здравоохранения.

Заметим, что для системы показателей оценки результативности системы оказания медицинской помощи при онкологических заболеваниях, мнения экспертов относительно показателя «количество коек в онкологических отделениях больниц в расчете на 10 000 чел. населения» (В) разделились. Трое из девяти экспертов считают, что при росте этого показателя вырастет также показатель обеспеченности диагностическим оборудованием. Двое других полагают, что последний, напротив — снизится. Наконец, четверо экспертов считают, что этот показатель никак не связан с другими. По этой причине соответствующая ему вершина на рисунке имеет пунктирную границу.



а



б

Рис. 1. Карты взаимного влияния ключевых показателей состояния региональной системы здравоохранения в части оказания медицинской помощи при а) онкологических заболеваниях; б) заболеваниях сердечно-сосудистой системы

Выводы

В работе проделан первый этап построения причинно-следственной модели региональной системы здравоохранения на основе аппарата взвешенных ориентированных графов и когнитивных карт, а именно — идентифицированы ключевые количественные показатели для оценивания состояния изучаемой системы в части результативности системы оказания медицинской помощи при онкологических заболеваниях, а также при

заболеваниях сердечно-сосудистой системы. Следующим этапом станет выявление факторов влияния на эти показатели. Третий этап заключается в верификации модели на имеющихся ретроспективных данных. Результатом должен стать инструмент количественного прогнозирования результатов тех или иных управляющих воздействий на среднесрочном горизонте планирования.

Следует отметить, что система здравоохранения является крайне сложной для идентификации. Об этом, в частности, свидетельствуют описанные выше существенные разночтения в экспертных оценках, особенно среди группы экспертов-«кардиологов». В то же время, в группе экспертов-«онкологов» наблюдается совпадение мнений по ряду ключевых вопросов, что позволяет рассчитывать на успешное решение задачи как минимум в этой части.

Библиографический список

1. Reibling, N. Worlds of healthcare: a healthcare system typology of OECD countries / N. Reibling, M. Ariaans, C. Wendt // *Health Policy*. – 2019. – Vol. 123, No 7. – P. 611–620.

2. Черкасов, С.Н. Современные методические подходы к планированию объемов медицинской помощи / С.Н. Черкасов, В.М. Шипова, Е.А. Берсенева, Д.О. Мешков, Л.Ю. Безмельницына, М.В. Лалабекова, А.В. Федяева, В.С. Олейникова // *Бюллетень Национального научно-исследовательского института общественного здоровья имени Н.А. Семашко*. – 2016. – № 4. – С. 95–109.

3. Мадьянова, В.В. Особенности смертности лиц старше трудоспособного возраста в Российской Федерации в 2012–2018 гг. / В.В. Мадьянова, Е.П. Какорина, Т.А. Клокова // *Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины*. – 2020. – Вып. 28, № 4. – С. 523–528.

4. Rana, J.S. Changes in Mortality in Top 10 Causes of Death from 2011 to 2018 / J.S. Rana, S.S. Khan, D.M. Lloyd-Jones S. Sidney // *Journal of general internal medicine*. – 2021. – No 36. – P. 2517–2518.

5. Авдеева, З.К. О некоторых принципах и подходах к построению коллективных когнитивных карт ситуаций / З.К. Авдеева, С.В. Коврига // *Управление большими системами: сборник трудов*. – 2014. – № 52. – С. 37–68.

Научное электронное издание

УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ

**ТРУДЫ XVIII ВСЕРОССИЙСКОЙ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

5–8 сентября 2022 г., Челябинск

Под общей редакцией академика РАН Д.А. Новикова
и заслуженного деятеля науки РФ О.В. Логиновского

Локальное электронное издание

Мин. системные требования:
Pentium 4, Internet Explorer, Acrobat reader 4.0 и выше

Дата подписания к использованию 20.12.2022
1 электронно-оптический диск (CD-R), 28 Мб,
Заказ № 473.

Издательский центр ЮУрГУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76
E-mail: izdat@susu.ru