Н А У Ч Н О - Т Е Х Н И Ч Е С К И Й

В Е С Т Н И К

П О В О Л Ж Ь Я

№7 2025

Направления:

1.2.2. – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ (технические науки)

2.3.1. – СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ (технические науки)

2.3.3. – АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ (технические науки)

2.3.5. – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ (физико-математические науки)

2.3.5. – МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ (технические науки)

2.3.6. – МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ (физико-математические науки)

Казань
2025

УДК 60
ББК 30-1
Н-66

Н-66 Научно-технический вестник Поволжья. №7 2025г. – Казань: ООО «Рашин Сайнс», 2025. – 338 с.
ISSN 2079-5920

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (реестровая запись от 08.05.2019 серия ПИ № ФС 77 -75732)
Журнал размещен в открытом бесплатном доступе на сайте www.ntvprt.ru, и в Научной электронной библиотеке (участвует в программе по формированию РИНЦ).
Журнал включен ВАК РФ в перечень научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.
Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» № Е12025.

Главный редактор Р.Х. Шагимуллин

Редакционная коллегия

С.В. Анаников – д.т.н., проф.; *Т.Р. Дебердеев* – д.т.н., проф.; *Б.Н. Иванов* – д.т.н., проф.;
В.А. Жихарев – д.ф-м.н., проф.; *В.С. Минкин* – д.х.н., проф.; *А.Н. Николаев* – д.т.н., проф.;
В.Ф. Тарасов – д.ф-м.н., проф.; *Х.Э. Харлампиди* – д.х.н., проф.; *М.В. Шулаев* – д.т.н., проф.

В журнале отражены материалы по теории и практике технических, физико-математических и химических наук.

Материалы журнала будут полезны преподавателям, научным работникам, специалистам научных предприятий, организаций и учреждений, а также аспирантам, магистрантам и студентам.

УДК 60
ББК 30-1

ISSN 2079-5920 **© Рашин Сайнс, 2025 г.**

СОДЕРЖАНИЕ

1.2.2. — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

Н.Е. Бортулев ОЦЕНКА НЕСТАЦИОНАРНОГО ОТРАВЛЕНИЯ РЕАКТОРА КСЕНОНОМ В РЕЖИМЕ МАНЕВРИРОВАННИЯ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 12

К.А. Брыксин, И.Л. Пластун МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ ГИАЛУРОНОВОЙ КИСЛОТЫ С ВОДОЙ 17

Е.К. Бурнышев, Ю.Г. Медведев, Н.В. Пустовой КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ ТОЧЕЧНОГО МОНОХРОМНОГО КОГЕРЕНТНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН 21

И.Н. Гарькин, Л.В. Левицкая, Д.С. Кремнев, М.А. Воробьев ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПУАССОНОВСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ ЭКСПЕРТИЗЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ 25

И.Н. Гарькин, Л.В. Левицкая, Д.С. Кремнев, М.А. Воробьев ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ АНАЛИЗЕ СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ УГОЛЬНЫХ ШАХТ 28

И.А. Гарькина, Л.Ш. Ахтямова, Л.И. Киямова, Ф.Ф. Фазыльзянов МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ 31

Д.А. Киряков, Н.М. Труфанова МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В БУРОВОЙ СКВАЖИНЕ 36

Л.М. Ковальчук, А.А. Комлев, Т.В. Бурнышева, Н.В. Пустовой АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДБОРА ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕБЕРНОЙ СТРУКТУРЫ АНИЗОГРИДНОЙ КОНСТРУКЦИИ 40

А.А. Корелин ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СТЕПЕНЬ СШИВКИ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ 43

Ку Дык Тоан, Нгуен Минь Хиеу, Д.А. Ахметшин, Н.К. Нуриев, Е.А. Печеный, Нгуен Ван Тхинь, До Као Минь РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА ДЛЯ РАСЧЁТА ЗОН ПОКРЫТИЯ WI-FI С УЧЁТОМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПРЕПЯТСТВИЙ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ 47

С.Н. Матвеев, А.П. Дровосеков, К.А. Сорокин, П.В. Прокопчук ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АНАЛОГА МОДЕЛИ КЭЛИ-КЛЕЙНА НА КОНЕЧНОМ ПОЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ C# 51

С.Л. Моругин ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОНТУРА ПО СВОЙСТВАМ СЕМЕЙСТВА КРИВЫХ 56

А.Д. Плужников, Л.В. Когтева, Е.А. Маврычев, Е.Н. Приблудова, С.Б. Сидоров, Е.Г. Чужайкин МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ АМПЛИТУДНЫХ ФЛЮКТУАЦИЙ ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ПЕРЕИЗЛУЧЕННЫХ ВОЗДУШНЫМИ ОБЪЕКТАМИ 62

Д.Е. Решетников, А.Н. Кожевников, К.А. Матвеев, Н.В. Пустовой АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ТРОСОВ 66

А.А. Решетов, Г.А. Гулий ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ СЛУЧАЙНОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С НЕСТАЦИОНАРНЫМ СПЕКТРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ 69

Е.И. Романенко, И.А. Банщикова, Н.В. Пустовой, Ю.С. Селиванов АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РЕАКЦИИ ОПОР В ANSYS 78

Ю.С. Селиванов, К.А. Матвеев, Е.И. Романенко РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С ПРИМеНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 82
Р.З. Хайруллин К ПОСТРОЕНИЮ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО ПАРАМЕТРА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА РАННИХ ЭТАПАХ РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ 86
Е.Г. Царькова, Ю.В. Чемарина МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РЕЦИДИВНОЙ ПРЕСТУПНОСТИ 90
К.О. Чичиров, Л.Ш. Ахтямова, Л.И. Киямова, М.А.Закирова ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ (КРИВОЙ ХАРРИНГТОНА) ПРИ ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ 94
М.Ю. Шрейдер, А.Д. Тарасов, Р.Д. Сулейменова, Д.В. Левченко МЕТОД ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ГРАФОВОЙ МОДЕЛИ 97

2.3.1. — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

А.М. Авербух РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ АЛГОРИТМА INCREMENTAL LAZY THETA* ДЛЯ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ 101
М.А. Балакин, А.Н. Гнатюк ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ НА ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ ДЕВЕЛОПЕРСКОГО ПРОЕКТА 104
П.П. Вепрева, О.П. Тимофеева РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРА 108
И.Ю. Гапицонов, А.Г. Жихарев, Е.К. Кабанов, А.В. Кузнецов, А.А. Дрога МЕТОД СИСТЕМНО-ОБЪЕКТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЕКТОВ КОМЛПЕКСНОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ 111
К.Е. Долженко, А.В. Кожина, Д.Р. Новиков, В.Р. Козлов АЛГОРИТМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 116
Д.С. Карпович, Л.Э. Петросян ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ КОНТИНГЕНТА ОБУЧАЮЩИХСЯ В ВУЗАХ 119
О.А. Кашинцева, А.В. Мясных РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ МНОГОЗНАЧНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОПЕРАТИВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА И ЗАМЕНЫ КЛАССОВ 124
А.В. Кожина, Д.Р. Новиков, К.Е. Долженко, В.Д. Хашин ИНТЕГРАЦИЯ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ЮРИДИЧЕСКИЕ ЧАТ-БОТЫ: ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ 129
В.Р. Козлов, А.В. Кожина, Д.Р. Новиков, К.Е. Долженко, В.Д. Хашин ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫЕ РЕШЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ДАННЫМИ 132
В.Р. Козлов, А.В. Кожина, Д.Р. Новиков, В.Д. Хашин ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОБУЧЕНИЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 135
В.Р. Козлов, Е.А. Сопов СИНТЕЗ КОЛЛЕКТИВОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ 139
Н.М. Кудрявцев, Е.А. Сопов РАЗРАБОТКА ВЕБ-СЕРВИСА ДЛЯ СБОРА И АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ 143
П.С. Кулясов, П.В. Мисевич ТЕХНОЛОГИЯ ОТОБРАЖЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДИАГРАММЫ ERC В СТРУКТУРУ ДАННЫХ РЕЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ 147

Л.С. Ломакина, И.Д. Чернобаев, А.Н. Двитовская, К.А. Корелин, Д.А. Белов ПРОБЛЕМА УСКОРЕНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ 154
Т.И. Мариупольский, Е.В. Храпунова, И.А. Панфилов, М.Б. Хамраев, А.А. Оганисян РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ПОЖАРОВ 158
Е.Е. Миргородская, Д.А. Васильев, О.В. Ушакова, А.Е. Черных, Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский ФОРМИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОЛЛЕКТИВА В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА КАДРОВ 162
С.Л. Моругин МОДЕЛЬ ДИАЛОГА С АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СЛУЖБОЙ ПОДДЕРЖКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОБЛЕМ КЛИЕНТОВ 170
Д.Р. Новиков, В.Р. Козлов, К.Е. Долженко, В.Д. Хашин АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ В ЗАДАЧАХ БАНКОВСКОГО СКОРИНГА 174
А.В. Прописнова, П.Г. Михайлова РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГРУЗОВ С ОПАСНЫМИ ХИМИЧЕСКИМИ ВЕЩЕСТВАМИ В УСЛОВИЯХ ВНЕДРЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЕРЕВОЗОЧНЫХ ДОКУМЕНТОВ 177
М.Р. Ремизов, А.М. Мартиросян, Д.М. Мартиросян, С.П. Дюсьмекеев, С.Т. Хасанов ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ 182
Р.А. Симонов, П.А. Шагалова, Д.В. Волкова, Р.С. Кузьмин ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ СЦЕНАРИЕВ ПОВЕДЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ 186
А.В. Тарасов, В.О. Сапожников, Д.В. Жевнерчук РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СОПРЯЖЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ОТКРЫТЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДОМЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ 190
С.А. Тихонов, А.А. Львов МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ СЕТЕВОГО ТРАНСПОРТА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ С ПРЕРЫВИСТЫМ СОЕДИНЕНИЕМ 194
Е.Ф. Трофимова, В.И. Полуничев АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПАССИВНЫХ СИСТЕМ АВАРИЙНОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ОТВОДОМ ТЕПЛА К АТМОСФЕРНОМУ ВОЗДУХУ 198
А.Н. Хайбуллин, С.А. Абашина, В.В. Бронская, К.В. Саерова, А.Р. Хайруллина, А.И. Шагеева, А.У. Аетов МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ В ИССЛЕДОВАНИИ ФИНАНСОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КРУПНЫХ КОМПАНИЙ 202
В.Д. Хашин, Д.Р. Новиков, А.В. Кожина, В.Р. Козлов, К.Е. Долженко ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ RAG-СИСТЕМЫ НА ТОЧНОСТЬ ОТВЕТОВ НА ВОПРОСЫ АБИТУРИЕНТОВ 206
Е.А. Шнякина, В.Н. Костин ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ НАРУШИТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО МОДЕЛИ 209
Т.М. Юсупов, О.В. Павлов, О.В. Хомутская ТЕХНОЛОГИЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА МЕТОДОМ ПРОЦЕССИНГА ДАННЫХ НА БАЗЕ КРИВОЙ МОРТОНА 213

2.3.3. — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

Д.Е. Абрамов, Ш.Р. Мурадхаджаев, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, Р.А. Юсупов, Ш.Р. Юсупов, А.Л. Овчинников ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДАТЧИКА ДИАПАЗОНА 5 ГГЦ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛАКТАТА В ПОТЕ СПОРТСМЕНА 219

Д.Е. Абрамов, П.С. Петухов, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, Р.А. Юсупов, Ш.Р. Юсупов, А.Л. Овчинников ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДАТЧИКА ДИАПАЗОНА 2,45 ГГЦ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛАКТАТА В ПОТЕ СПОРТСМЕНА 223
А.Э. Аксенов, А.А. Кузнецов, Р.М. Зайнутдинов, А.В. Михеев, В.Ю. Дубровин, Е.А. Селюков, И.И. Нуреев РАДИОФОТОННЫЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ СЕНСОРНЫХ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ 227
Р.И. Алексеев, И.И. Нуреев, С.Н. Нигматуллин, А.А. Потанин, Э.М. Шарафутдинов, Т.Р. Гизатуллин, Г.Ж. Нуреева РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ НАГРЕВА В ТЕРМОАНЕМОМЕТРАХ СКОРОСТИ ПОТОКА В ТРУБОПРОВОДАХ 231
Р.И. Алексеев, И.И. Нуреев, С.Н. Нигматуллин, А.А. Силантьева, Э.М. Шарафутдинов, Т.Р. Гизатуллин, Г.Ж. Нуреева МНОГОСЕРДЦЕВИННЫЙ ОДНОВОЛОКОННЫЙ ТЕРМОАНЕМОМЕТР СКОРОСТИ ПОТОКА В ТРУБОПРОВОДАХ 235
Ф.М. Виноградов, С.В. Литвинов, А.А. Верещагин ВЛИЯНИЕ СТЫКОВКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА ПОТЕРИ СИГНАЛА 239
М.С. Виноградов, Т.А. Дехтярь, И.О. Разинкин АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ АППАРАТУРЫ НА ФНЗС В РЛС С ЦИФРОВЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ СИГНАЛОВ 243
А.Д. Громов ТРАНСЛЯЦИЯ EDDL ОПИСАНИЙ 246
Д.В. Гусев, О.А. Билоус СИНТЕЗ КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПАРА В СУШИЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ 249
Т.М. Закирьянов, А.З. Петрова, О.В. Никишина, Д. Даххам, Г.А. Морозов, С.В. Смирнов, Ю.Е. Седельников МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ 252
Т.М. Закирьянов, А.З. Петрова, О.В. Никишина, Д. Даххам, Г.А. Морозов, С.В. Смирнов, Ю.Е. Седельников МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛА БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ 256
Ю.В. Зубкова, Ю.Р. Никитин, Д.Б. Зубков ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ПИ-РЕГУЛЯТОРОМ 261
А.А. Казин ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОМОДУЛЕЙ 433 МГЦ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ СБОРА ДАННЫХ 265
М.А. Карпов, Е.А. Морозова ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ QAM-СИГНАЛОВ В РАДИОКАНАЛЕ С ЗАМИРАНИЯМИ НА ИМИТАЦИОННОМ ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ 269
В.С. Кондратьев, Ю.Е. Седельников, Р.М. Зайнутдинов, А.В. Михеев, Е.А. Селюков, О.В. Никишина, В.В. Садчиков ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАССИВА МИКРОВОЛНОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ 272
Р.Р. Константинов, Р.В. Фахрутдинов, Е.А. Мезенцева, Д.А. Веденькин, В.Ю. Дубровин, А.Р. Насыбуллин, А.А. Силантьева УПРАВЛЯЕМАЯ БРЭГГОВСКАЯ СТРУКТУРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АНТЕНН РАДИОФОТОННЫХ ЛОКАТОРОВ И ФАЗОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЕНСОРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ 280
В.И. Курир МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ 287
Р.Р. Нигматуллин, А.Р. Насыбуллин, Ю.Е. Седельников, Р.В. Фархутдинов, О.В. Никишина, С.Г. Алюшина, В.И. Баязитова МИКРОПОЛОСКОВЫЙ СВЧ-КОМПАРАТОР НА РЕЗОНАНСЕ ФАНО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОРОШКОВ 294

Д.А. Сайфутдинов, А.З. Петрова, Г.А. Морозов, Д. Даххам, О.Г. Морозов, С.В. Смирнов, М.И. Гараев АНАЛИЗ ПОТЕРИ ВЕСА КАК КРИТЕРИЙ КОНТРОЛЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СВЧ НАГРЕВА ЦЕЛЫХ ШИШЕК 298
Д.А. Сайфутдинов, А.З. Петрова, Г.А. Морозов, Д. Даххам, О.Г. Морозов, С.В. Смирнов, М.И. Гараев АНАЛИЗ ПОТЕРИ ВЕСА КАК КРИТЕРИЙ КОНТРОЛЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СВЧ НАГРЕВА ПОЛОВИН ШИШЕК 302
А.А. Чесноков, А.Р. Насыбуллин, Т.М. Ишкаев, Р.В. Фархутдинов, О.В. Никишина, С.Г. Алюшина, В.И. Баязитова УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ НА КОЛЬЦЕВОМ РЕЗОНАТОРЕ 306

2.3.6. — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Д.В. Кондратов, Л.А. Кочкуров, Н.Ю. Хороводова АНАЛИЗ РИСКОВ НАРУШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИПТОВАЛЮТ И КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ КОШЕЛЬКОВ 311
А.Н. Прилепский, С.В. Литвинов ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ M-PSK-СИГНАЛОВ НА СТЕНДЕ KEYSIGHT-PROPSIM 314

АННОТАЦИИ 318

THE RELEASE MAINTENANCE

1.2.2. — TECHNICAL SCIENCES — MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

N.E. Bortulev ASSESSMENT OF TRANSIENT XENON POISONING OF A REACTOR IN THE MANEUVERING MODE BY MACHINE LEARNING METHODS 12
K.A. Bryksin, I.L. Plastun ANALYSIS OF INTERMOLECULAR INTERACTION AND COMPLEXATION OF HYALURONIC ACID WITH WATER 17
E.K. Burnyshev, Yu.G. Medvedev, N.V. Pustovoy CELLULAR AUTOMATA MODEL OF A POINT MONOCHROME COHERENT SOURCE OF ELECTROMAGNETIC WAVES 21
I.N. Garkin, L.V. Levitskaya, D.S. Kremnev, M.A. Vorobyov FEATURES OF USING POISSON DISTRIBUTION IN INDUSTRIAL SAFETY EXAMINATION OF COAL MINES 25
I.N. Garkin, L.V. Levitskaya, D.S. Kremnev, M.A.Vorobyov USING STOCHASTIC MODELS IN ANALYSING THE STATE OF COAL MINES STRUCTURES 28
I.A. Garkina, L.Sh. Akhtyamova, L.I. Kiyamova, F.F. Fazylzyanov MATHEMATICAL MODELING OF DEGRADATION PROCESSES 31
D.A. Kiryakov, N.M. Trufanova MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN A BOREHOLE 36
L.M. Kovalchuk, A.A. Komlev, T.V. Burnysheva, N.V. Pustovoy AUTOMATING THE SELECTION OF PARAMETER VALUES FOR THE RIB STRUCTURE OF AN ANISOGRID STRUCTURE 40
A.A. Korelin INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE DEGREE OF CROSSLINKING OF POLYMER INSULATION 43
Cu Duc Toan, Nguyen Minh Hieu, D.A. Akhmetshin, Н.К. Нурцев, E.A. Pechenyy, Nguyen Van Thinh, Do Cao Minh DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL AND ALGORITHM FOR CALCULATING WI-FI COVERAGE AREAS TAKING INTO ACCOUNT VARIOUS TYPES OF INDOOR OBSTACLES 47
S.N. Matveev, A.P. Drovosekov, K.A. Sorokin, P.V. Prokopchuk INTERPRETATION OF THE FINITE FIELD ANALOGUE OF THE CAYLEY-KLEIN MODEL USING THE C# PROGRAMMING LANGUAGE 51
S.L. Morugin CONTOUR RECONSTRUCTION BASED ON THE PROPERTIES OF A FAMILY OF CURVES 56
A.D. Pluzhnikov, L.V. Kogteva, E.A. Mavrychev, E.N. Pribludova, S.B. Sidorov, E.G. Chuzhaykin METHOD OF AMPLITUDE FLUCTUATIONS MODELING FOR RADAR SIGNALS RE-RADED BY AIR OBJECTS 62
D.E. Reshentikov, A.N. Kozhevnikov, K.A. Matveev, N.V. Pustovoy THE ALGORITHM OF ELASTIC ROD EIGENVALUES IDENTIFICATION 66
A.A. Reshetov, G.A. Guliy ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF BUILDINGS AND STRUCTURES UNDER RANDOM SEISMIC LOADING WITH NON-STATIONARY SPECTRAL CONTENT 69
E.I. Romanenko, I.A. Banshchikova, N.V. Pustovoy, Y.S. Selivanov AUTOMATED ALGORITHM FOR DETERMINING THE ULTIMATE LOAD OF STRUCTURES BASED ON SUPPORT REACTION ANALYSIS IN ANSYS 78
Y.S. Selivanov, K.A. Matveev, E.I. Romanenko SOLVING THE PROBLEM OF TOPOLOGICAL OPTIMIZATION USING NEURAL NETWORKS 82
R.Z. Khayrullin ON THE CONSTRUCTION OF THE DISTRIBUTION LAW OF THE KEY PARAMETER OF MULTICOMPONENT TECHNICAL SYSTEMS AT THE EARLY STAGES OF DEVELOPMENT AND TESTING 86
E.G. Tsarkova, Y.V. Chemarina MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMICS RECIDIVISM 90

K.O. Chichirov, L.Sh. Akhtyamova, L.I. Kiyamova, M.A. Zakirova USING THE DESIRABILITY FUNCTION (HARRINGTON CURVE) TO ASSESS THE PERFORMANCE OF VENTILATION SYSTEMS AT POWER SECTORS 94
M.Yu. Shreyder, A.D. Tarasov, R.D. Suleymenova, D.V. Levchenko METHOD FOR ASSESSING THE STRUCTURAL SECURITY OF AN OBJECT USING A GRAPH MODEL 97

2.3.1. — TECHNICAL SCIENCES — SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT AND INFORMATION PROCESSING

A.M. Averbukh DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF THE INCREMENTAL LAZY THETA ALGORITHM FOR AUTONOMOUS NAVIGATION IN DYNAMIC ENVIRONMENTS 101
M.A. Balakin, A.N. Gnatyuk APPLICATION OF A SYSTEMATIC METHODOLOGY FOR ASSESSING THE PROPERTIES OF AN URBANIZED AREA AT THE INITIAL STAGES OF A DEVELOPMENT PROJECT 104
P.P. Vepreva, O.P. Timofeeva DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF SOFTWARE APPLICATION FOR PROCESSING INTERFEROMETER RESULTS 108
I.Yu. Gapitstonov, A.G. Zhikharev, E.K. Kabanov, A.V. Kuznetsov, A.A. Droga SYSTEM-OBJECT MODELING METHOD FOR INTEGRATED TERRITORY DEVELOPMENT PROJECTS 111
K.E. Dolzhenko, A.V. Kozhina, D.R. Novikov, V.R. Kozlov DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM FOR SOLVING MACHINE LEARNING TASKS 116
D.S. Karpovich, L.E. Petrosyan STUDENT ENROLLMENT DYNAMICS 119
O.A. Kashintseva, A.V. Myasnykh DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE OF A MULTI-LABEL CLASSIFICATION SYSTEM WITH THE POSSIBILITY OF OPERATIVELY CHANGING THE NUMBER AND REPLACING CLASSES 124
A.V. Kozhina, D.R. Novikov, K.E. Dolzhenko, V.D. Khashin INTEGRATION OF LARGE LANGUAGE MODELS INTO LEGAL CHATBOTS: RESEARCH AND IMPLEMENTATION 129
V.R. Kozlov, A.V. Kozhina, D.R. Novikov, K.E. Dolzhenko, V.D. Khashin INTERPRETED SOLUTIONS IN MACHINE LEARNING TASKS WITH SENSITIVE DATA 132
V.R. Kozlov, A.V. Kozhina, D.R. Novikov, V.D. Khashin AN EVOLUTIONARY APPROACH FOR TRAINING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS 135
V.R. Kozlov, E.A. Sopov SYNTHESIS OF NEURAL NETWORK TEAMS BASED ON THE DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM 139
N.M. Kudryavtsev, E.A. Sopov DEVELOPMENT OF A WEB SERVICE FOR DATA COLLECTION AND ANALYSIS FOR E-COMMERCE SYSTEMS 143
P.S. Kulyasov, P.V. Misevich TECHNOLOGY FOR MAPPING MODIFIED EPC DIAGRAMS INTO THE LOGICAL SCHEME IN THE RELATIONAL DATABASE 147
L.S. Lomakina, I.D. Chernobaev, A.N. Dvitovskaya, K.A. Korelin, D.A. Belov THE PROBLEM OF SPEEDING UP CALCULATIONS IN APPLIED TASKS OF DIAGNOSING OBJECTS OF VARIOUS PHYSICAL NATURE 154
T.I. Mariupolskiy, E.V. Khrapunova, I.A. Panfilov, M.B. Khamraev, A.A. Oganisyan SOLVING PROBLEMS OF INTELLIGENT ANALYSIS OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC FIRES 158
E.E. Mirgorodskaya, D.A. Vasiliev, O.V. Ushakova, A.E. Chernykh, N.P. Mityashin, Yu.B. Tomashevsky FORMATION OF A PRODUCTION TEAM IN CONDITIONS OF STAFF SHORTAGE 162
S.L. Morugin MODEL OF DIALOGUE WITH AN AUTOMATED SUPPORT SERVICE FOR SOLVING CLIENT'S INFORMATION PROBLEMS 170

D.R. Novikov, V.R. Kozlov, K.E. Dolzhenko, V.D. Khashin ANALYSIS OF THE APPLICATION OF DIFFERENTIAL EVOLUTION IN CREDIT SCORING 174
A.V. Propisnova, P.G. Mikhaylova DEVELOPMENT OF INFORMATION SYSTEMS FOR THE TRANSPORTATION OF DANGEROUS CHEMICAL GOODS UNDER THE IMPLEMENTATION OF THE STATE INFORMATION SYSTEM OF ELECTRONIC TRANSPORT DOCUMENTS 177
M.R. Remizov, A.M. Martirosian, D.M. Martirosian, S.P. Dusmekeev, S.T. Khasanov ASSESSMENT OF WIRELESS TELECOMMUNICATION NETWORKS RELIABILITY 182
R.A. Simonov, P.A. Shagalova, D.V. Volkova, R.S. Kuzmin APPLICATION OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES FOR IMPLEMENTATION AND RESEARCH OF INFORMATION SYSTEM BEHAVIOR SCENARIOS 186
A.V. Tarasov, V.O. Sapozhnikov, D.V. Zhevnerchuk DOMAIN CONSTRAINTS BASED OPEN INFORMATION SYSTEM COMPONENTS CONNECTION MODEL DEVELOPMENT 190
S.A. Tikhonov, A.A. L'vov MODELING NETWORK TRANSPORT METHODS IN WIRELESS NETWORKS WITH INTERMITTENT CONNECTIVITY 194
E.F. Trofimova, V.I. Polunichev ANALITICAL REVIEW OF PASSIVE EMERGENCY COOLING SYSTEMS FOR REACTOR INSTALLATIONS WITH HEAT REMOVAL TO ATMOSPHERIC AIR 198
A.N. Khaibullin, S.A. Abashina, V.V. Bronskaya, K.V. Saerova, A.R. Khairullina, A.I. Shageeva, A.U. Aetov METHODS OF SYSTEM ANALYSIS AND MATHEMATICAL STATISTICS IN THE STUDY OF FINANCIAL INDICATORS OF LARGE COMPANIES 202
V.D. Khashin, D.R. Novikov, A.V. Kozhina, V.R. Kozlov, K.E. Dolzhenko RESEACH OF THE IMPACT OF RAG SYSTEM PARAMETERS ON THE ACCURACY OF RESPONSES TO QUESTIONS OF APPLICANTS 206
E.A. Shniakina, V.N. Kostin ASSESSING THE PROBABILITY OF DETECTING AN INVADER DEPENDING ON ITS MODEL 209
T.M. Yusupov, O.V. Pavlov, O.V. Khomutskaya TECHNOLOGY OF RENDERING DIGITAL MODELS OF THE RELIEF BY DATA PROCESSING BASED ON THE MORTON CURVE 213

2.3.3. — TECHNICAL SCIENCES — AUTOMATION AND MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTION

D.E. Abramov, Sh.R. Muradkhadzhaev, O.G. Morozov, I.I. Nureev, R.A. Yusupov, Sh.R. Yusupov, A.L. Ovchinnikov ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF A 5 GHZ SENSOR FOR MONITORING LACTATE IN ATHLETE'S SWEAT 219
D.E. Abramov, P.S. Petukhov, O.G. Morozov, I.I. Nureev, R.A. Yusupov, Sh.R. Yusupov, A.L. Ovchinnikov ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF A 5 GHZ SENSOR FOR MONITORING LACTATE IN ATHLETE'S SWEAT 223
A.E. Aksenov, A.A. Kuznetsov, R.M. Zainutdinov, A.V. Mikheev, V.Yu. Dubrovin, E.A. Selyukov, I.I. Nureev MICROWAVE PHOTONIC ANALYZER FOR PHOTODETECTORS SPECTRAL CHARACTERIZATION IN SENSOR AND TELECOMMUNICATION NETWORKS 227
R.I. Alekseev, I.I. Nureev, S.N. Nigmatullin, A.A. Potanin, E.M. Sharafutdinov, T.R. Gizatullin, G.Zh. Nureeva SOLVING THE PROBLEM OF HEATING IN THERMO ANEMOMETERS OF FLOW VELOCITY IN PIPELINES 231
R.I. Alekseev, I.I. Nureev, S.N. Nigmatullin, A.A. Silant'eva, E.M. Sharafutdinov, T.R. Gizatullin, G.Zh. Nureeva MULTICORE ONE FIBER THERMO-ANEMOMETER FOR FLOW VELOCITY MEASUREMENTS IN PIPELINES 235
F.M. Vinogradov, S.V. Litvinov, A.A. Vereshchagin THE EFFECT OF OPTICAL FIBER DOCKING FOR SIGNAL LOSS 239

M.S. Vinogradov, T.A. Dekhtyar, I.O. Razinkin ALGORITHM FOR COMPENSATING HARDWARE IMPACT ON THE AMBIGUITY FUNCTION IN RADAR WITH DIGITAL WAVEFORM GENERATION 243
A.D. Gromov TRANSLATION OF EDDL DESCRIPTIONS 246
D.V. Gusev, O.A. Bilous SYNTHESIS OF A CASCADE SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL OF VAPOR PRESSURE IN THE DRY CYLINDER 249
T.M. Zakiryanov, A.Z. Petrova, O.V. Nikishina, D. Dakhkham, G.A. Morozov, S.V. Smirnov, Yu.E. Sedelnikov MODELING OF A MICROWAVE HUMIDITY SENSOR WITH TEMPERATURE COMPENSATION 252
T.M. Zakiryanov, A.Z. Petrova, O.V. Nikishina, D. Dakhkham, G. A. Morozov, S.V. Smirnov, Yu.E. Sedelnikov MODELING A MICROWAVE SENSOR FOR MEASURING MATERIAL HUMIDITY WITHOUT TEMPERATURE COMPENSATION 256
Yu.V. Zubkova, Yu.R. Nikitin, D.B. Zubkov RESEARCH OF THE MOBILE ROBOT CONTROL SYSTEM MODEL WITH A PI CONTROLLER 261
A.A. Kazin APPLICATION OF 433 MHz RADIO MODULES IN PRODUCTION DATA COLLECTION SYSTEMS 265
M.A. Karpov, E.A. Morozova EVALUATION OF QAM SIGNAL NOISE IMMUNITY IN A FADING RADIO CHANNEL USING A LABORATORY TEST BENCH 269
V.S. Kondratyev, Yu.E. Sedelnikov, R.M. Zainutdinov, A.V. Mikheev, E.A. Selyukov, O.V. Nikishina, V.V. Sadchikov DESIGN, OPTIMIZATION AND PARAMETRIC STUDY OF MICROWAVE RESONATOR ARRAY FOR WATER QUALITY DETERMINATION 272
R.R. Konstantinov, R.V. Fakhrutdinov, E.A. Mezentseva, D.A. Vedenkin, V.Yu. Dubrovin, A.R. Nasybullin, A.A. Silantyeva CONTROLLED BRAGG STRUCTURE FOR DRIVING THE PHASE DISTRIBUTION OF MICROWAVE PHOTONIC LOCATOR ANTENNAS AND THE PHASE SENSITIVITY OF DIELECTRIC PERMITTIVITY SENSORS 280
V.I. Kurir METHODS OF REDUCING SHORT-CUT CURRENT IN THE POWER INDUSTRY 287
R.R. Nigmatullin, A.R. Nasybullin, Yu.E. Sedelnikov, R.V. Farkhutdinov, O.V. Nikishina, S.G. Alyushina, V.I. Bayazitova MICROSTRIP MICROWAVE COMPARATOR BASED ON FANO RESONANCE FOR POWDER DENSITY STUDY 294
D.A. Saifutdinov, A.Z. Petrova, G.A. Morozov, D. Dakhkham, O.G. Morozov, S.V. Smirnov, M.I. Garayev ANALYSIS OF WEIGHT LOSS AS A CONTROL CRITERION FOR AUTOMATION OF WHOLE CONES MICROWAVE HEATING PROCESS 298
D.A. Saifutdinov, A.Z. Petrova, G.A. Morozov, D. Dakhkham, O.G. Morozov, S.V. Smirnov, M.I. Garayev ANALYSIS OF WEIGHT LOSS AS A CONTROL CRITERION FOR AUTOMATION OF HALF CONES MICROWAVE HEATING PROCESS 302
A.A. Chesnokov, A.R. Nasybullin, T.M. Ishkaev, R.V. Farkhutdinov, O.V. Nikishina, S.G. Alyushina, V.I. Bayazitova UNIVERSAL METHOD FOR MEASURING SPECIFIC DENSITY OF SUBSTANCES AND MATERIALS ON A RING RESONATOR 306

2.3.6. — PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES — METHODS AND SYSTEMS OF INFORMATION SECURITY, INFORMATION SECURITY

D.V. Kondratov, L.A. Kochkurov, N.Yu. Khorovodova ANALYSIS OF THE RISKS OF INFORMATION SECURITY BREACHES IN THE FIELD OF USING CRYPTOCURRENCIES AND CRYPTOGRAPHIC WALLETS 311
A.N. Prilepskiy, S.V. Litvinov EVALUATION OF THE NOISE IMMUNITY OF M-PSK SIGNALS AT THE KEYSIGHT-PROPSIM STAND 314

ABSTRACTS 318

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ — 1.2.2.

1.2.2.

Н.Е. Бортулев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Инженерная школа ядерных технологий,
Отделение ядерно-топливного цикла,
Томск, neb5@tpu.ru

ОЦЕНКА НЕСТАЦИОНАРНОГО ОТРАВЛЕНИЯ РЕАКТОРА КСЕНОНОМ В РЕЖИМЕ МАНЕВРИРОВАННИЯ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В данной работе с помощью программы Wims создаются обучающая и тестовые модели реактора, для каждой модели генерируются режимы работы реактора на разных уровнях мощности. Набор данных, полученный из обучающей модели реактора, используется для обучения модели, которая предсказывает изменение запаса реактивности реактора в режиме маневрирования. Машинное обучение производится методом линейной регрессии с помощью библиотеки scikitlearn языка программирования Python. Результаты прогнозирования изменения величины запасы реактивности во времени, полученные с помощью модели машинного обучения, сравниваются с данными об изменении величины запаса реактивности во времени полученных из расчета 3-ех тестовых моделей реактора, полученных с помощью программы Wims.

Ключевые слова: *машинное обучение, отравление реактора ксеноном, маневрирование реактора.*

Сложность эксплуатации маневренных режимов АЭС обусловлено спецификой управления реактором в условиях непрерывно протекающих ксеноновых процессов в активной зоне реактора [1]. Влияние ксеноновых процессов характеризуется ростом, либо снижением мощности, что в отсутствии корректирующих мер может привести к останову реактора, либо к превышению установленной мощности [2]. В целях предотвращения подобных инцидентов, и подтверждения устойчивости реакторов ВВЭР1200 и ВВЭР1000, проводились исследования ксеноновых переходных процессов [3, 4]. В практическом плане знаковым было испытание ВВЭР-1000 в режиме суточного графика нагрузки 100-80-100% на 5-м энергоблоке Запорожской АЭС, результаты испытаний легли в основу усовершенствованных алгоритмов управления [5]. Аналогичные испытания в режиме суточного графика нагрузки проводились на 6-м энергоблоке Нововоронежской АЭС, в ходе которых подтвердилась возможность эксплуатации энергоблока ВВЭР-1200 в суточном графике нагрузки в конце топливной кампании в диапазоне изменения электрической мощности 46—88% номинальной [6].

В качестве информационной поддержки оператора, для прогнозирования ксеноновых переходных процессов в ходе испытаний, было предусмотрено программное обеспечение «Имитатор реактора» (ИР), разработанная в Курчатовском институте. ИР позволяет рассчитывать изменения концентраций ^{149}Sm и ^{135}Xe, расчет состояния реактора и прогнозирования дальнейшего поведения [7]. Впоследствии ИР вводилась в эксплуатацию на большинстве энергоблоков ВВЭР 1000 [8]. Для расчета и прогнозирования состояния реактора ИР использует законы физики и, согласно известным закономерностям, производит расчет. При этом в программе имеется ряд допущений, упрощающих расчет состояний реактора, которые в последствии могут привести к ошибке при расчете некоторых состояний реактора [7].

В рамках существующего тренда на ускоренное развитие машинного обучения и нейронных сетей, предлагается переосмысление традиционного подхода, в котором состояние реактора рассчитывается и прогнозируется на основе физики. В качестве альтернативы предлагается использование методов машинного обучения для прогнозирования состояние реактора. В рамках данной работы предлагается методом линейной регрессии обучить модель на основе данных, полученных с помощью программы Wims, а затем сравнить предсказания обученной модели с тремя тестовыми режимами работы сгенерированными в программе Wims независимо от модели использованной для обучения, впоследствии сравнив изменения запасов реактивности во времени полученных с помощью модели машинного обучения и трех тестовых режимов.

Для генерации набора данных использовалась модель элементарной ячейка реактора ВВЭР-1200, реализованная в коде wims-anl. Набор данных представляет из-себя значений концентраций основных изотопов, оказывающих наибольшее влияние на нейтронный баланс, в том числе усредненной плотности потока нейтронов по радиусу ячейки реактора (далее – нейтронный поток), энерговыработки Q (далее – энерговыработка) и мощности реактора на каждой итерации. При этом, в расчетной модели wims-anl были приняты следующие допущения:

– на каждой итерации мощность реактора задается вручную, и относительно установленной мощности реактора производится расчет;

– на каждой итерации рассчитывается эффективный коэффициент размножения нейтронов k_{eff}, относительно него на каждой итерации рассчитывается оставшийся запас реактивности ρ;

– в работе сравниваются изменения запасов реактивности во времени;

– в программе не предусмотрено управление органами регулирования, на каждой итерации предполагается, что реактор находится в критичном состоянии и работает на заданном уровне мощности;

– температура топлива, оболочки, замедлителя и теплоносителя задается на каждой итерации вручную [9].

Согласно упомянутым допущениям, был сгенерирован режим работы реактора, который в последствии использовался для создания модели машинного обучения. Режим работы реактора представлен на рисунке 1.

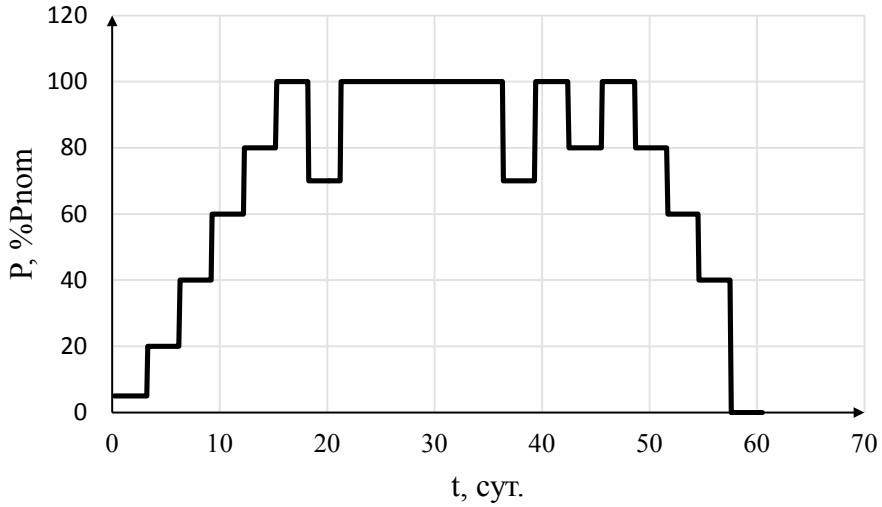


Рис. 1 – График работы реактора от времени t используемый в качестве обучающего набора данных

Для создания моделей машинного обучения использовалась библиотека scikitlearn языка программирования Python. Для обучения модели набор данных необходимо разделить на признаки и на искомую величину, для данной задачи, величина, которую должна предсказывать модель – величина реактивности в момент времени t, признаки –

концентрации изотопов, мощность, поток нейтронов и энерговыработка.

Задача машинного обучения заключается в нахождении функции реактивности, в общем виде функция выглядит следующим образом:

$$\rho = f(x_1,\ x_2, x_3 \dots\ x_n\ ), \quad (1)$$

где $x_1,\ x_2, x_3 \dots\ x_n$ – набор признаков, характеризующих функцию реактивности ρ.

Выбор метода, по которому определяется вид функции (1) зависит от связи реактивности с остальными параметрами. Приоритет отдается параметрам, которые описывают значение искомой величины линейно, наименее информативные параметры как правило, для обучения модели машинного обучения не используются. В ходе работы было определенно, что наилучшая связь наблюдаются при обучении модели по значениям энерговыработки, концентрации ксенона и концентрации урана U^{235} (далее – уран). Тогда искомую функцию можно записать в следующем виде:

$$\rho = f(Q,\ N(U^{235}),\ N(Xe^{135})\ ), \quad (2)$$

А в качестве модели машинного обучения использовалась модель линейной регрессии с квадратичной функцией потерь [10].

После обучения модели на обучающем наборе данных**,** с помощью программы wims-anl были дополнительно сгенерированы еще 3 режима работы реактора, необходимые для верификации модели. Режимы работы реактора для верификации модели представлены на рисунке 2.

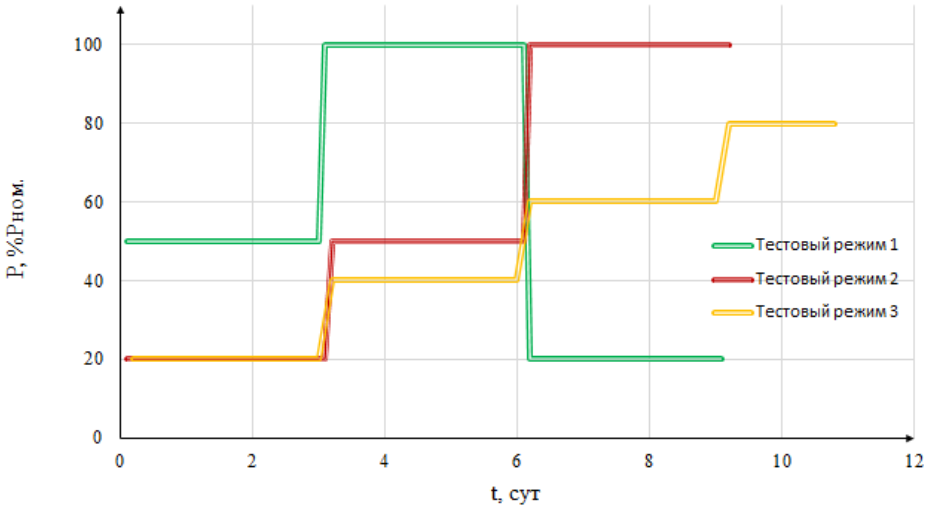


Рис. 2 – Сгенерированные программой wims-anl режимы работы реакторы для верификации модели

Сравнение фактического изменения реактивности (изменения реактивности, полученного с помощью расчетной программы wims-anl) и изменения реактивности, полученного моделью (путем обучения модели на наборе данных, сгенерированных программой wims-anl) для трех тестовых режимов работы реактора представлены на рисунке 3.

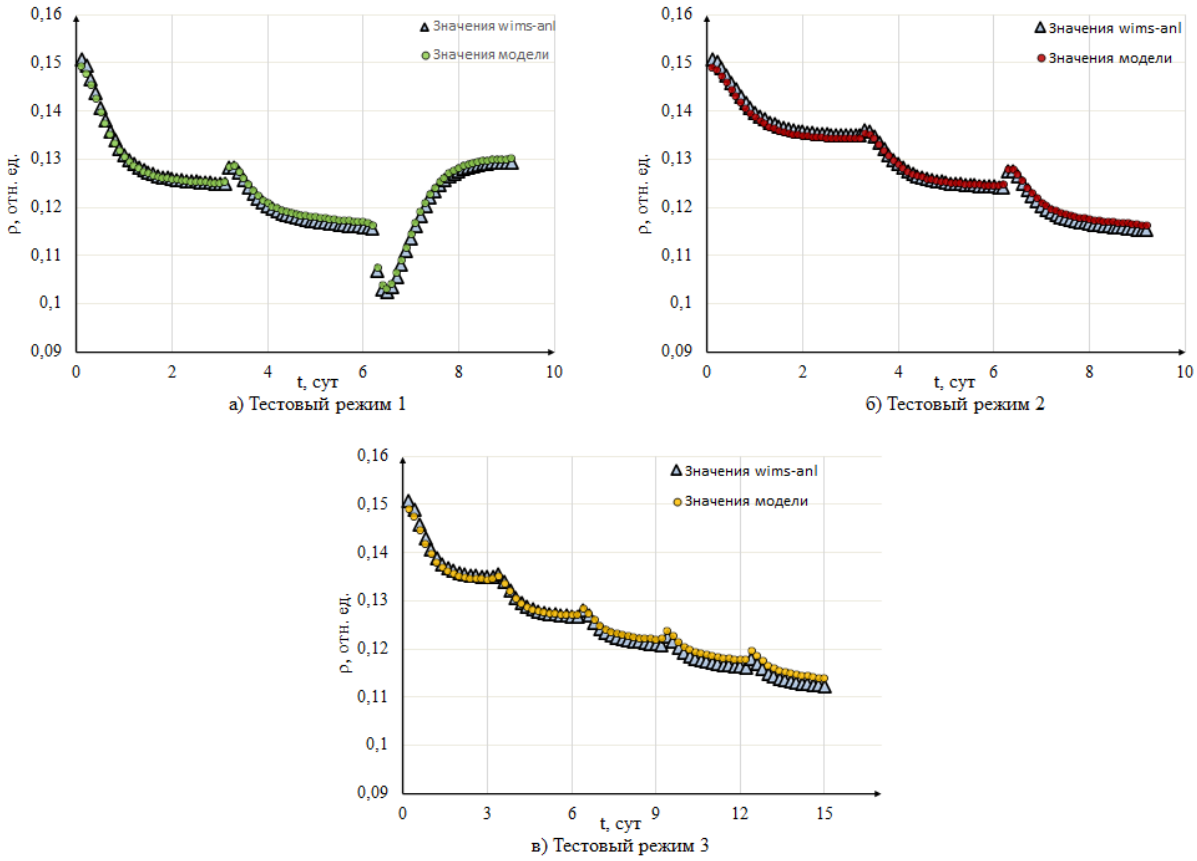


Рис. 3 – Сравнение значений запасов реактивности, полученных с помощью модели машинного обучения и значений, сгенерированных программой wims-anl

Если условиться тем, что в процессе эксплуатации реактора существует возможность измерения концентрации ксенона и концентрации урана, тогда согласно полученным результатам, представленным на рисунке 3, существует возможность предсказания изменения реактивности во времени методами машинного обучения.

Стоит отметить, что результаты расчетов, полученных с помощью модели машинного обучения, хорошо согласуются с результатами расчетной модели программы wims-anl, однако в процессе эксплуатации реактора зачастую нет возможности измерения концентрации ксенона на прямую. В связи с этим возникает задача, о нахождении возможности описания изменения реактивности, используя при этом для обучения модели машинного обучения параметры, которые измеряются напрямую. В wims-anl таких параметров несколько: мощность, энерговыработка и нейтронный поток. При попытке обучить модель по этим признакам методом линейной регрессии, погрешность между результатами запаса реактивности полученного с помощью wims-anl и результатами полученных с помощью модели линейной регрессии для трех тестовых режимов на рисунке 3 - слишком велика и для описания изменения реактивности в переходных процессах не годится. Однако в реальном легководном реакторе, количество параметров измеряемых на прямую гораздо больше трех по сравнению с расчетной моделью программы wims-anl, что при обучении модели методом линейной регрессии, ввиду больше количества потенциальных признаков, дает больше возможностей для обучения модели.

Заключение

В ходе работы была обучена модель машинного обучения методом линейной регрессии, предсказывающая изменение запаса реактивности во времени, при изменении мощности реактора. Для обучения модели, с помощью программы wims-anl был сгенерирован режим работы реактора, в котором в течении определенного времени изменяется мощность, для каждого расчетного шага выбирались значения концентраций ксенона и урана, мощность энерговыработка и плотность потока нейтронов. Из общего массива данных составлялась обучающая выборка, которая в последствие использовалась для того, чтобы научить модель

предсказывать изменение реактивности во времени. Модель была верифицирована для трех тестовых режимов, сгенерированных с помощью программы wims-anl, представленных на рисунке 2. Среднеквадратичная ошибка (Mean squared error) для трех тестовых режимов не превышала значения 0,00001.

Таким образом, если в ходе эксплуатации реактора прямо или косвенно можно определить значение концентрации ксенона и урана, тогда можно с хорошей точностью описать изменение реактивности во времени. При отсутствии концентраций ксенона и урана, результаты модели не приемлемы.

При условии существовании гораздо большего количества прямо измеряемых параметров в легководных реакторах, существует потенциальная возможность применения модели линейной регрессии для предсказания изменения реактивности. Конечная модель, которая окажется применима для реального реактора, в последствии может потребовать использование более комплексного подхода и в последствии другого метода машинного обучения.

Список литературы

1. *Овчинников С.* Эксплуатационные режимы ВВЭР. – Энергоатомиздат, 1988.
2. *Терешонок В.А., Степанов В.С., Поваров В.П., Лебедев О.В.* Исследование поведения реакторной установки ВВЭР-1000 в переходном режиме, вызванном малым снижением мощности. - Атомная энергия, 2002, т. 93, вып. 4. с. 319-320.
3. *Аверьянова С.П. и др*. Исследование ксеноновых переходных процессов в ВВЭР-1000 на Тяньваньской АЭС (Китай) //Атомная энергия. – 2008. – Т. 105. – №. 4. – С. 183-189.
4. *Аверьянова С.П. и др.* Исследование ксеноновых переходных процессов в ВВЭР-1200 на Нововоронежской АЭС //Атомная энергия. – 2018. – Т. 124. – №. 4. – С. 183-188.
5. *Филимонов П.Е. и др.* Испытания маневренности ВВЭР-1000 на 5-м блоке Запорожской АЭС //Атомная энергия. – 1998. – Т. 85. – №. 5. – С. 364-367.
6. *Филимонов П.Е. и др.* Испытания ВВЭР-1200 при эксплуатации в режиме суточного графика нагрузки на 6-м энергоблоке Нововоронежской АЭС //Атомная энергия. – 2020. – Т. 129. – №. 3. – С. 123-129.
7. *Филимонов П.Е., Мамичев В.В., Аверьянова С.П.* Программа «Имитатор реактора» для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000 //Атомная энергия. – 1998. – Т. 84. – №. 6. – С. 560-563.
8. *Аверьянова С.П. и др.* Развитие, внедрение и современное состояние расчетной программы «Имитатор реактора» //Атомная энергия. – 2008. – Т. 105. – №. 4. – С. 237-240.
9. *Deen J.R., Woodruff W.L., Costescu C.I.* WIMS-D4M user manual. – Argonne National Lab., 1995. – №. ANL--RERTR/TM-23.
10. А*нтонов Г.В., Иванов С.И.* Линейная регрессия как один из методов статистического исследования //Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – №. 2. – С. 64-75.

1.2.2.

К.А. Брыксин, И.Л. Пластун

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Институт Электронной техники и приборостроения,
кафедра «Информационная безопасность автоматизированных систем»,
Саратов, kir.bryksin@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ ГИАЛУРОНОВОЙ КИСЛОТЫ С ВОДОЙ

Методами квантовохимического молекулярного моделирования изучены проявления межмолекулярного взаимодействия на основе водородных связей в ИК спектрах гиалуроновой кислоты и в смесях гиалуроновой кислоты с молекулами воды. На основе расчета структуры молекулярных комплексов и соответствующих им ИК-спектров с последующим анализом параметров образующихся водородных связей даны оценки степени комплексообразования гиалуроновой кислоты с водой.

Ключевые слова: *ИК-спектр, молекулярное моделирование, теория функционала плотности, водородные связи.*

Одним из важнейших факторов, влияющих на функциональные свойства гиалуроновой кислоты, является её молекулярная организация в растворе. Водные растворы ГК могут содержать как мономерные молекулы, так и ассоциаты различной степени — от димеров до высокомолекулярных агрегатов. Эти формы отличаются друг от друга по степени межмолекулярного взаимодействия, что отражается на их спектральных характеристиках.

Целью данного этапа исследования является сравнительный анализ ИК-спектров мономерной и димерной форм гиалуроновой кислоты в водной среде. Полученные данные будут способствовать более глубокому пониманию механизмов самоорганизации ГК в растворе и могут быть использованы для контроля структуры биоматериалов на её основе.

Моделирование структуры и расчёт ИК спектров молекул и их комплексов осуществлялись на основе метода теории функционала плотности (ТФП) [1] с использованием функционала B3LYP и базисного набора 6-31G(d) [2]. Процедуры молекулярного моделирования, включая оптимизацию молекулярных структур и расчёт ИК спектров, были проведены на основе программного комплекса Gaussian. Для визуализации молекулярных структур и ИК спектров были использованы программный редактор Avogadro [3] и авторская программа визуализации ИК спектров [4], строящая ИК спектр по числовым значениям, полученным в Gaussian.

Были рассчитаны структуры и ИК спектры мономера и димера гиалуроновой кислоты, а также структуры и ИК спектры молекул мономера и димера гиалуроновой кислоты с добавлением молекул воды. Дан анализ рассчитанных параметров водородных связей в образующихся молекулярных комплексах.

Для анализа молекулярного взаимодействия молекул гиалуроновой кислоты с водой были проанализированы структуры и ИК спектры мономера гиалуроновой кислоты и 10 молекул воды. Количество молекул воды обусловлено количеством возможных точек присоединения к мономеру гиалуроновой кислоты. Рассчитанная структура молекулярного комплекса представлена на рисунке 1.

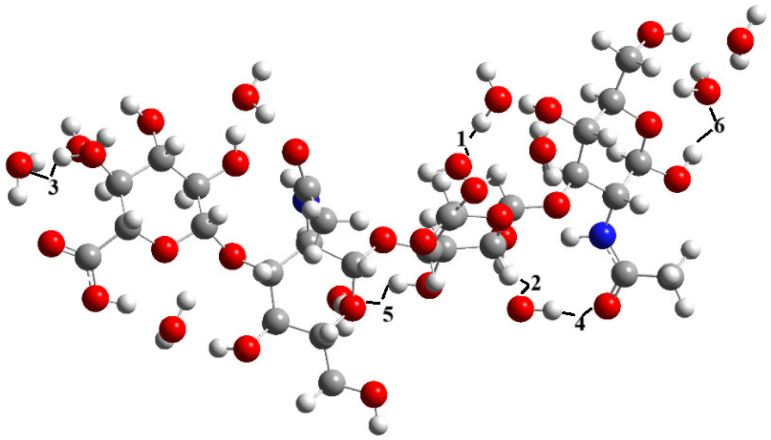


Рис. 1 - Рассчитанная структура молекулярного комплекса мономера гиалуроновой кислоты с водой. Потенциальные точки присоединения обозначены цифрами 1-6.

На рисунке 2 представлен ИК спектр рассчитанного молекулярного комплекса.

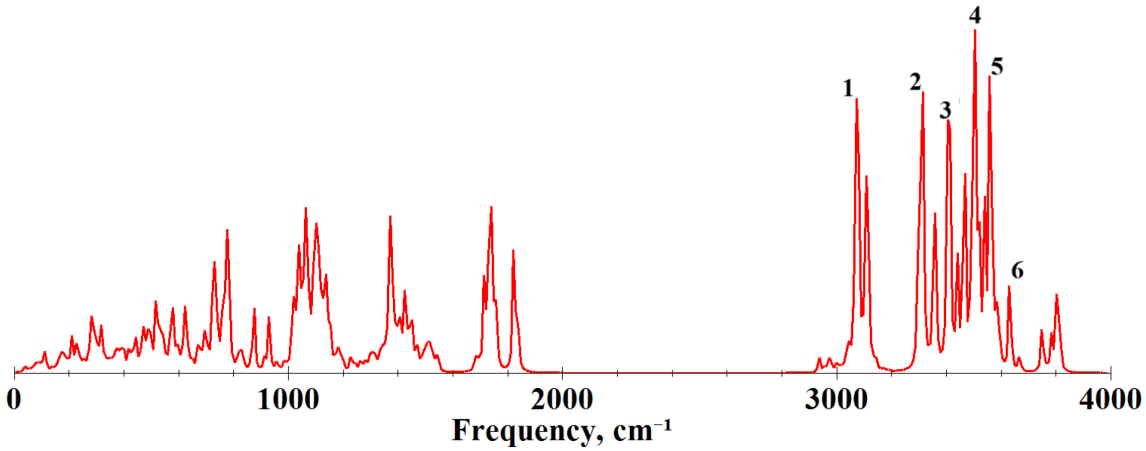


Рис. 2 - Рассчитанный ИК спектр молекулярного комплекса мономера гиалуроновой кислоты с водой. Потенциальные точки присоединения обозначены цифрами 1-6.

На основе расчётов была составлена таблица 1, в которой указаны параметры водородных связей в молекулярном комплексе. Частота для водородной связи 1 в мономере составила 3610 см$^{-1}$, а для водородной связи 2 — 3608 см$^{-1}$. Водородные связи также образовались из-за частоты колебаний молекул воды — 3762 см$^{-1}$.

Параметры образовавшихся водородных связей приведены в таблице 1.

Расчётные значения энергии были получены с помощью эмпирической формулы Иогансена [1]:

$$-\Delta H = 0.3 \cdot \sqrt{\Delta\nu - 40},$$

где $-\Delta H$ — приращение энтальпии, которое является термодинамическим показателем энергии связи, $\Delta\nu$ — величина сдвига частоты валентных колебаний водородных связей (ΔH, ккал/моль, $\Delta\nu$, см$^{-1}$).

Таблица 1 - Рассчитанные параметры водородных связей молекулярных комплексов гиалуроновой кислоты и воды

Номер связи	Тип связи	Длина H-связи Å	Длина водородного мостика, Å	Частота cm^{-1}	Частотный сдвиг $\Delta\nu$, cm^{-1}	Энергия связи -ΔH, kcal/mol	Интенсивность, I_{IR}, km/mol
1	O-H...O	1.66	2.65	3076	534	6.9	580
2	O-H...O	1.66	2.63	3112	496	6.6	1151
3	O-H...O	1.72	2.68	3357	405	5.7	874
4	O-H...O	1.74	2.72	3411	351	5.2	1093
5	O-H...O	1.80	2.77	3467	297	4.8	734
6	O-H...O	1.99	2.88	3506	256	4.4	725

Основываясь на классификации водородных связей [2], можно сделать вывод, что при присоединении молекул воды к мономеру гиалуроновой кислоты образуются водородные связи средней прочности, о чём свидетельствует энергия образованных связей, длина водородного мостика и длина H-связи.

Следующим шагом было присоединение молекул воды к димеру гиалуроновой кислоты. Всего к димеру было присоединено 20 молекул воды. Рассчитанная структура показана на рис. 3. Цифры обозначают возможные точки присоединения воды.

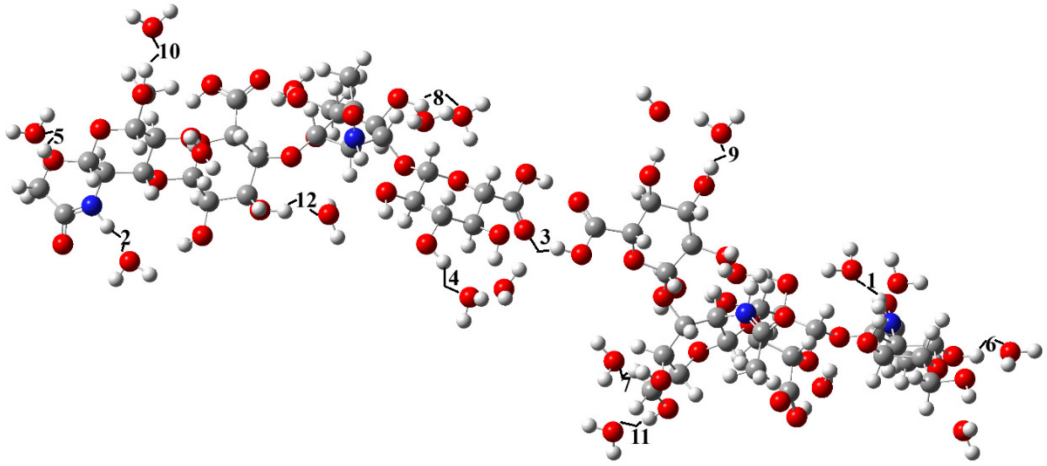


Рис. 3 - Рассчитанная структура молекулярного комплекса димера гиалуроновой кислоты с водой. Потенциальные точки присоединения обозначены цифрами 1-12.

На рисунке 4 показан ИК-спектр молекулярного комплекса димера гиалуроновой кислоты с водой.

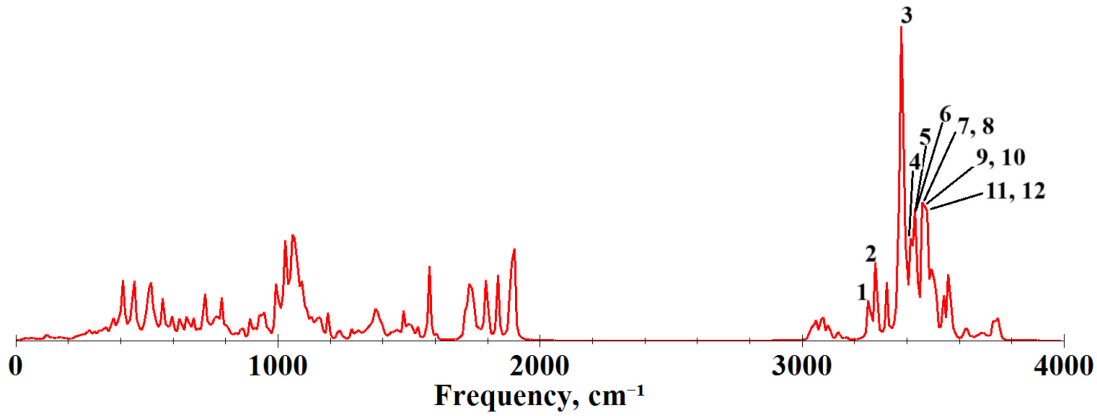


Рис. 4 - Рассчитанный ИК спектр молекулярного комплекса мономера гиалуроновой кислоты с водой. Потенциальные точки присоединения обозначены цифрами 1-12.

В соответствии с расположением частот колебаний групп в димере гиалуроновой кислоты была составлена таблица 2, содержащая параметры образующихся водородных связей.

Таблица 2 - Рассчитанные параметры водородных связей молекулярных комплексов димера гиалуроновой кислоты и воды

Номер связи	Тип связи	Длина Н-связи,Å	Длина водородного мостика, Å	Частота, cm^{-1}	Частотный сдвиг $\Delta\nu$, cm^{-1}	Энергия связи -ΔH, kcal/mol	Интенсивность, I_{IR}, km/mol
1	N-H...O	1.64	2.65	3256	506	6.4	687
2	N-H...O	1.64	2.67	3280	482	6.3	1151
3	O-H...O	1.56	2.53	3375	243	4.2	3829
4	O-H...O	1.73	2.71	3388	374	5.4	1549
5	O-H...O	1.75	2.74	3416	346	5.2	837
6	O-H...O	1.76	2.71	3426	336	5.1	631
7	O-H...O	1.68	2.66	3435	327	5.0	854
8	O-H...O	1.73	2.71	3436	326	5.0	540
9	O-H...O	1.69	2.67	3461	301	4.8	904
10	O-H...O	1.76	2.74	3469	293	4.7	602
11	O-H...O	1.75	2.73	3477	285	4.6	572
12	O-H...O	1.79	2.74	3507	255	4.3	588

В результате анализа полученных результатов можно сделать вывод, что при присоединении молекул воды к мономеру и димеру гиалуроновой кислоты образуются водородные связи средней прочности. Кроме того, образование молекулярного комплекса димера гиалуроновой кислоты с водой усиливает водородные связи, образующиеся между мономерами, составляющими димер.

Таким образом, было установлено, что присоединение молекул воды к мономеру и димеру гиалуроновой кислоты усиливает водородные связи, а также внутримолекулярное взаимодействие между компонентами гиалуроновой кислоты. Этот результат позволяет оценить степень гидрофильности гиалуроновой кислоты и подтвердить эффективность использования гиалуроновой кислоты в растворах и гелях в отсутствие водной среды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 25-22-00258, https://rscf.ru/project/25-22-00258/

Список литературы

1. *Кон В.* Электронная структура вещества – волновые функции и функционалы плотности // Успехи физических наук. 2002. Т. 172, № 3. С. 336–348.

2. *Becke A.D.* Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange // Journal of Chemical Physics. 1993. V. 98, № 7. P. 5648–5652. DOI: 10.1063/1.464913.

3. Avogadro – Free cross-platform molecular editor – Avogadro. Funding for the Avogadro manual was provided by the University of Pittsburgh Department of Chemistry. Pittsburgh, PA, 2015. URL: https://avogadro.cc/ (дата обращения: 27.06.2025).

4. *Бокарев А.Н., Пластун И.Л.* Программа графической визуализации результатов численного моделирования на основе методов квантовой механики: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015616290 от 05.06.2015 / Роспатент.

1.2.2.

[1]Е.К. Бурнышев, [2]Ю.Г. Медведев канд. техн. наук, [3]Н.В. Пустовой д-р техн. наук

Новосибирский государственный технический университет,
[3]факультет летательных аппаратов,
кафедра прочности летательных аппаратов,
[1,2]факультет прикладной математики и информатики,
кафедра параллельных вычислительных технологий,
[2]ИВМиМГ СО РАН,
Новосибирск, e.burnyshev@alumni.nsu.ru, yu.medvedev@corp.nstu.ru, sr-nso@adm.nstu.ru

КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ ТОЧЕЧНОГО МОНОХРОМНОГО КОГЕРЕНТНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

В работе представлены клеточно-автоматная модель электромагнитной волны, распространяющейся от монохромного когерентного направленного источника, и ее программная реализация. Приведены результаты компьютерных экспериментов, которые показывают соответствие разработанной модели физике процесса распространения электромагнитных волн.

Ключевые слова: *клеточные автоматы, электромагнитные волны, имитационное моделирование.*

Введение. Традиционно для моделирования электромагнитных волн (ЭМВ) используют уравнения Максвелла [1]. В рамках развития клеточно-автоматного (КА) подхода к моделированию разрабатываются модели, основанные на других принципах, КА модели являются дискретными и имитационными [2]. Известны КА модели акустических волн [3]. ЭМВ имеют другую природу. Во-первых, они поперечные, а не продольные, как акустические. Во-вторых, в них происходит колебание не одного, а двух компонентов – вектора электрической напряженности **E** и вектора магнитной индукции **H**. На текущий момент не известно КА моделей ЭМВ, учитывающих все требуемые эффекты: отражение, преломление, дифракцию, рассеяние и т.д. В рамках разработки такой модели первым шагом является построение прототипа, способного моделировать два объекта – двумерное пространство, в котором распространяется ЭМВ, и точечный монохромный когерентный направленный источник ЭМВ, производящий излучение в выбранном направлении как в непрерывном, так и в импульсном режиме.

В настоящей работе предложен такой прототип, описана его программная реализация, представлены результаты компьютерных экспериментов.

Общее описание модели. Разработанная модель позволяет воспроизводить распространение электромагнитного излучения от направленного монохромного когерентного точечного источника в однородной двумерной среде. При этом вектор электрической напряженности **E** лежит в плоскости этой среды.

Топология клеточного автомата в предложенной модели квадратная. Отношение соседства между клетками определяется окрестностью фон Неймана (рисунок 1, а). Основу разработанной модели составляет подход, в котором внутри элементов клеточного массива располагаются частицы. На каждой итерации (срабатывании клеточного автомата) частицы синхронно меняют свои характеристики и могут переместиться в соседнюю клетку. Правило, по которому это происходит заложено в функции переходов клеточного автомата.

Клетка обладает рядом константных и переменных характеристик. Константные характеристики клетки: тип клетки; индексы клетки (i, j) в клеточном массиве, соответствующие некоторым координатам (x, y) в двумерном пространстве; коэффициент поглощения ($\alpha = 0$); коэффициент преломления ($n = 1$). Совокупность находящихся в клетке

модельных частиц – переменная характеристика клетки.

Характеристики модельной частицы также, как и характеристики клетки разделяются на константные и переменные (рисунок 1, б). Константные характеристики модельной частицы: амплитуда E_0 вектора электрической напряженности **E**; направление движения θ; начальная фаза φ_0; частота ν. Переменные характеристики модельной частицы: значение вектора **E**; текущая фаза φ; длина волны λ; координаты x, y.

а) б)

Рис. 1 – Базовые элементы модели: а – модельная клетка с окрестностью фон Неймана; б – модельная частица и направление её движения ($\varphi_0 = 0$)

Функция переходов клеточного автомата носит детерминированный характер. Для различных типов элементов клеточного массива функция переходов выполняется по-разному. В текущей реализации определены два типа клеток – источник и среда. Для клеток источника функция переходов на каждой итерации работает в два этапа. На первом этапе генерируются новые частицы. Характеристики полученных частиц однозначно определяются параметрами источника. На втором этапе работы осуществляется переход частиц в соседние клетки.

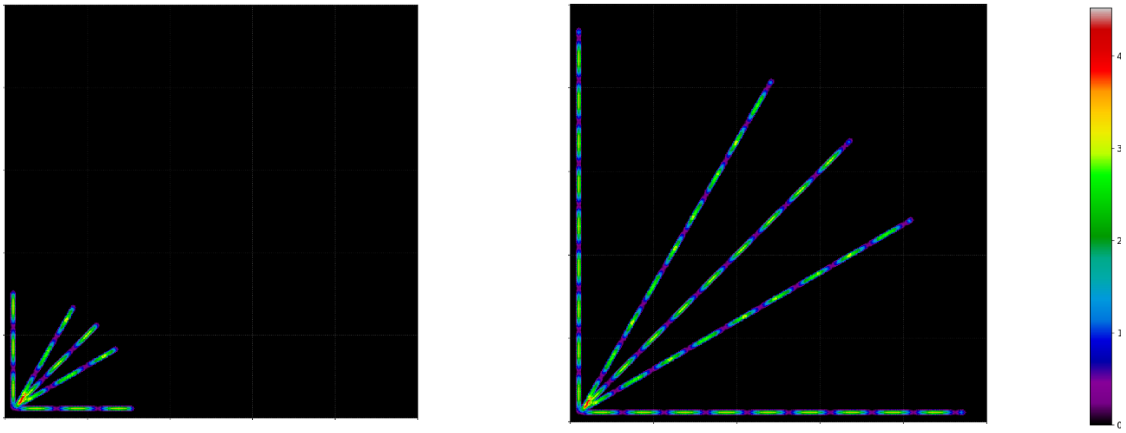
Для клеток среды функция переходов отвечает только за распространение частиц внутри клеточного массива. На каждой итерации осуществляется обход соседей каждой клетки и определяется, какие частицы от какого соседа должны в нее переместиться (рисунок 2).

```
//left neighbour
neighbour_cell = cell + 1;
for (int i = 0; i < neighbour_cell->photon_count; ++i)
{
    current_particle = neighbour_cell->particles[i];
    if (1.0f <= current_particle.delta_speed
        && true == current_particle.is_fly_by_x
        && 0.0f < current_particle.cos)
        {
            move_particle_from_neighbour(cell, neighbour_cell, i);
        }
}
```

Рис. 2 – Перемещение частиц от левого соседа

На рисунке 2 представлена часть программной процедуры, реализующей перемещение частиц внутри клеточного массива. Отметим, что программная реализация клеточного автомата осуществлена на языке СИ с использованием библиотеки клеточно-автоматных топологий CATlib [4].

Тестирование. В первой тестовой задаче (рисунок 3) в левом нижнем углу расчетной области располагались пять направленных монохромных когерентных точечных источников. Каждый источник за одну итерацию генерировал по одной частице со следующими параметрами: $\lambda = 100$ клеток; $\varphi_0 = 0$; $E_0 = 10$; направление движения θ. Размер клеточного массива был равен 500 на 500.



а) б)

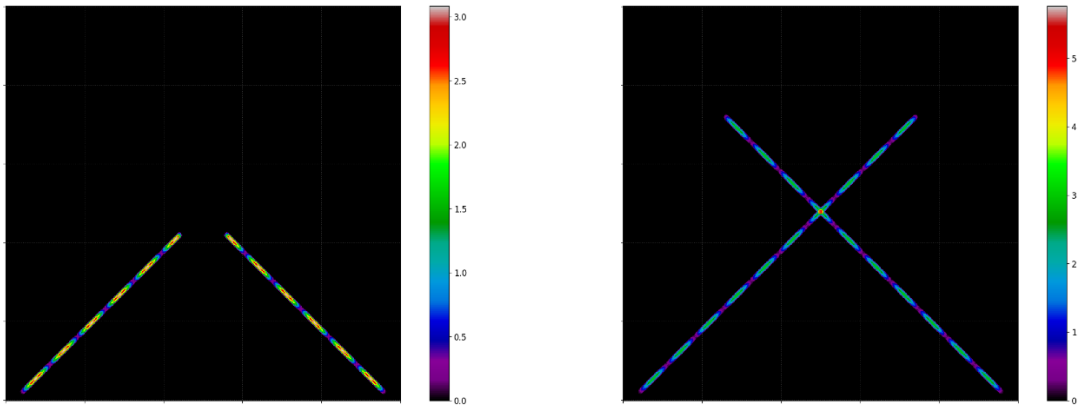
Рис. 3 – Распространение ЭМВ от пяти источников (θ = 0, π/6, π/4, π/3, π/2): а – 200 итераций; б – 650 итераций

Модуль графической обработки результатов расчета был написан на языке Python. На рисунке 3 изображено поле нормы вектора **E**. Результирующее значение в клетке вычислялось следующим образом:

$$\|\boldsymbol{E}_{cell}\|_2 = \left\|\sum \boldsymbol{E}_{particles}\right\|_2, \quad (1)$$

$$\left\|\boldsymbol{E}_{particles}\right\|_2 = |E_0 * \sin\varphi|. \quad (2)$$

В качестве второго теста выступала задача с двумя источниками, лучи которых пересекаются (рисунок 4). Источник, расположенный в левом нижнем углу расчетной области, испускал частицы под углом π/2, а источник в правом нижнем углу – под углом 3π/2.



а) б)

Рис. 4 – Интерференция ЭМВ от двух источников: а – 400 итераций; б – 700 итераций

Из рисунка 4 видно, что значение поля в точке пересечения лучей значительно больше, чем во всей остальной расчетной области. Этот факт свидетельствует о корректном способе расчета, а также закладывает основу для дальнейшего развития разработанной модели.

Заключение. В работе представлены КА модель ЭМВ, распространяющейся от монохромного когерентного направленного источника, и ее программная реализация. Приведены результаты компьютерных экспериментов, которые показывают соответствие разработанной модели физике процесса распространения ЭМВ. На основе этих экспериментов можно спрогнозировать, что обобщение этой модели на ненаправленный источник будет давать сферический фронт волны, а излучение от двух источников будет образовывать классическую интерференционную картину.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН FWNM-2025-0005.

Список литературы

1. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. — Издание 4-е, стереотипное. — М.: Физматлит, 2005. — 656 с. — («Теоретическая физика», том VIII).
2. *Bandman O.* Simulation Spatial Dynamics by Probabilistic Cellular Automata // Fifth International Conference ACRI-2002, Geneva, 2002. - Lecture Notes in Computer Science.- Spriger:Berlin.-2002.-Vol.2493 (Ed. B.Chopard). P. 10-19.
3. *Markova V.P., Ostapkevich M.B.* The Implementation of Cellular Automata Interference of Two Waves in LuNA Fragmented Programming System // Proceedings of the 14th International Conference on Parallel Computing Technologies (PaCT-2017), LNCS, Vol. 10421. 2017. P. 225-231. DOI: 10.1007/978-3-319-62932-2_21.
4. *Medvedev Y.* Architecture of the Cellular Automata Topologies Library // Bull. Nov. Comp. Center, Comp. Science, 46 (2022), P. 27-41.

1.2.2.

[1]И.Н. Гарькин, [2]Л.В. Левицкая, [2]Д.С. Кремнев, [2]М.А. Воробьев

[1]Российский университет дружбы народов,
Москва,
[2]Московский государственный университет технологии и управления им.К.Г.Разумовского,
Пенза

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПУАССОНОВСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ ЭКСПЕРТИЗЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Особенности применения пуассоновского распределения для количественной оценки вероятности возникновения аварийных и инцидентных событий при проведении экспертизы промышленной безопасности на угольных шахтах. Представлен детальный анализ предпосылок использования данной модели, включая независимость, редкость событий, и постоянство среднего показателя возникновения происшествий во времени. Оценивается соответствие характеристик пуассоновского распределения реальной статистике аварий и инцидентов в угольной промышленности. Выделяются ограничения подхода, связанные с возможным влиянием сезонных факторов, периодичности технико-технологических процессов, переменной интенсивности опасных событий.

Ключевые слова: *промышленная безопасность, угольные шахты, пуассоновское распределение, анализ риска, вероятностное моделирование, аварийные события, инциденты, статистика происшествий.*

Постановка задачи

Анализ частоты возникновения аварий и чрезвычайных ситуаций в угольных шахтах актуален для оценки промбезопасности. Пуассоновское распределение широко используется для моделирования количества редких событий на фиксированном временном интервале. Математическая строгость и прозрачность этой модели делают ее эффективным инструментом экспертной работы.

Математическая постановка задачи

Пуассоновское распределение описывает вероятность фиксированного числа событий n в интервале времени, если среднее количество событий в этом интервале равно λ:

$$P(n;\lambda) = \frac{\lambda^n}{n!}e^{-\lambda}$$

где n=0,1,2…– количество инцидентов

λ>0 среднее число инцидентов за интересующий промежуток времени

Например, если по статистике на шахте в среднем происходит λ=2 аварии в год, то вероятность того, что в следующем году будет ровно одна авария:

$$P(1;2) = \frac{2^1}{1!}e^{-2} = 2e^{-2} = 2e^{-2} \approx 0{,}2707$$

А вероятность того, что в году произойдет три и более аварий:

$$P(n\geq 3;2)=1-P(0;2)-P(1;2)-P(2;2)$$

Подставим значения:

$P(0;2)=200!e^{-2}=e^{-2}\approx 0{,}1353 P(1;2)=2e^{-2}\approx 0{,}2707 P(2;2)=\frac{2^2}{2!}e^{-2}\approx 0{,}2707$

$$P(n\geq 3;2)=1-(0{,}1353+0{,}2707+0{,}2707)=1-0{,}6767=0{,}3233$$

Таким образом, вероятность того, что в следующем году на шахте будет три и более аварий, составляет примерно 32,3%.

Оценка параметра λ

Параметр λ обычно оценивают с использованием выборочных данных:

$$\hat{\lambda} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} n_i$$

где n_i — число событий в i-м наблюдаемом периоде (например, в году), а k — длина выборки (количество лет наблюдения).

Допустим, за последние 7 лет на шахте было зарегистрировано инцидентов: 1, 3, 2, 0, 1, 2, 4.

$$\hat{\lambda} = \frac{1+3+2+0+1+2+4}{7} = \frac{13}{7} \approx 1{,}86$$

Доверительный интервал

Для параметра λ можно построить доверительный интервал, используя свойства пуассоновского распределения или асимптотическую нормальность оценки [1,2]:

$$Var(n)=\lambda$$

Значит, стандартная ошибка для выборки объема k:

$$\sigma_{\hat{\lambda}} = \sqrt{\frac{\hat{\lambda}}{k}}$$

Для приведённого примера:

$$\sigma_{\hat{\lambda}} = \sqrt{\frac{1{,}86}{7}} \approx 0{,}515$$

95%-доверительный интервал для λ (по нормальному приближению):

$$\hat{\lambda} \pm 1{,}96\sigma_{\hat{\lambda}}$$

Подставляем:

$$1{,}86 \pm 1.96 \times 0,\ 515 \Longrightarrow (0.85,\ 2.87)$$

То есть с вероятностью 95% истинная средняя частота аварий лежит в этом диапазоне. Проверка применимости предпосылок пуассоновского распределения. Главные математические предпосылки:

1. Независимость событий
2. Постоянство интенсивности (стабильность λ)
3. Редкость событий (малое среднее значение на малых интервалах)

Если, например, наблюдается явное увеличение аварий после конкретного происшествия, требуется учитывать зависимость и либо сжимать временные интервалы, либо использовать более сложные модели, такие как поток Нэймана, разреженный поток или пуассоновские процессы с переменной интенсивностью (λ(t)) [3].

Математическое моделирование рисков на предприятии

Пуассоновы интервалы между событиями описываются экспоненциальным распределением:

$$f(t)=\lambda e^{-\lambda t}$$

Например, если λ=2 аварии в год, то среднее время между авариями составляет: $E(T) = \frac{1}{\lambda} = 0{,}5 = 6$ *месяцев*

Это позволяет экспертно оценить вероятный период до следующего происшествия [4]. Если рассматривать сумму рисков по нескольким независимым шахтам с параметрами $\lambda_1,\lambda_2,...,\lambda_m$, общий риск также имеет пуассоновское распределение с суммарным параметром:

$$\lambda_{общ}=\lambda_1+\lambda_2+...+\lambda_m$$

Это позволяет проводить комплексную оценку рисков для угольных бассейнов, объединённых предприятий или отрасли в целом и разрабатывать мероприятия по профилактике аварий с учетом распределения риска между отдельными объектами. Такой подход применим как для годового, так и для более коротких или длительных периодов, а также позволяет учитывать ввод в эксплуатацию новых объектов или изменение

интенсивности происшествий на уже действующих шахтах путём своевременного обновления параметров модели [5]. Кроме того, агрегирование данных по группам предприятий делает возможным выявление статистически значимых отклонений и аномалий, направляя внимание экспертов на специфические участки с повышенным уровнем риска и требующие более детального анализа и дополнительных мер по обеспечению безопасности производства.

Вывод

Пуассоновское распределение зарекомендовало себя как эффективный инструмент для анализа и количественной оценки аварийных рисков при экспертизе промышленной безопасности угольных шахт. Его применение позволяет не только прогнозировать ожидаемое число аварийных и инцидентных событий за определённый период, но и строить доверительные интервалы для оценки неопределённости полученных результатов. Это существенно способствует обоснованию управленческих решений по снижению производственных рисков и выделению приоритетных направлений для проведения профилактических мероприятий.

Вместе с тем, для повышения достоверности оценок необходимо регулярно проводить обновление параметра λ (средней частоты событий) на основе самой актуальной и корректной статистики аварий и инцидентов, а также корректно учитывать все возможные изменения в горнотехнических условиях, применяемых технологиях и организационных мерах безопасности. В случаях, когда по статистике выявляются признаки переменной интенсивности возникновения событий или наличия зависимости между происшествиями — например, вследствие сезонности, технологических изменений либо каскадных аварий, — рекомендуется использование модифицированных моделей: пуассоновских процессов с нестационарной интенсивностью, моделей смешанного типа, либо процессов с зависимыми событиями.

Таким образом, пуассоновское распределение эффективно применяется как базовый подход для оценки рисков, однако наилучшие результаты достигаются при его интеграции с расширенным анализом специфики выявленных событий, учётом реальных условий работы объектов и использованием современных методов математического моделирования промышленной безопасности.

Список литературы

1. *Абдуллазянов Э.Ю., Сабитов Л.С., Попов А.О., Гарькин И.Н.* Геотехнический расчет влияния строительства объектов энергетики на окружающую застройку//Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2025. Т. 17. № 1 (65). С. 3-9

2. *Лобов И.М., Ступина А.Э., Гарькин И.Н., Ахтямова Л.Ш.* Архитектурное формирование строительных производственных комплексов на базе недействующих угольных шахт (на примере Донбасса)//Региональная архитектура и строительство. 2024. № 3 (60). С. 207-213.

3. *Железняков А.А., Гарькина И.А.* Математическое моделирование при решении ряда практических задач // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2025. – № 2(57). – С. 134-139

4. *Сюй И., Бережной Д.В., Пискунов А.А.* Вычисление напряжений в кольце обделки тоннеля при термическом нагружении // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 3. С. 95-98

5. *Гарькин И.Н., Гарькина И.А., Кудишина А.Э.* Совершенствование методики расчета виброэкранов с учетом многослойности основания и множественных источников вибрации // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. 2025. № 1 (20). С. 34-38

1.2.2.

[1]И.Н. Гарькин, [2]Л.В. Левицкая, [2]Д.С. Кремнев, [2]М.А. Воробьев

[1]Российский университет дружбы народов,
Москва,
[2] Московский государственный университет технологии и управления им.К.Г.Разумовского,
Пенза

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ АНАЛИЗЕ СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

В современных условиях эксплуатации угольных шахт вопросы обеспечения безопасности и устойчивости конструкций приобретают особую значимость. Многообразие воздействующих нагрузок, сложные геолого-технические условия, наличие случайных факторов обуславливают необходимость применения современных методов анализа состояния строительных конструкций шахт. В статье рассматривается применение стохастических моделей для прогнозирования и оценки состояния конструкций угольных шахт. Описаны основные методы построения стохастических моделей, приведены примеры их использования для оценки рисков разрушения, долговечности и надежности конструкций.

Ключевые слова: *промышленная безопасность, угольные шахты, стохастические модели, анализ риска, вероятностное моделирование, аварийные события, инциденты, статистика происшествий.*

Постановка задачи

Угольная промышленность традиционно связана с риском возникновения аварийных ситуаций, в значительной степени обусловленных непредсказуемыми изменениями горно-геологических условий и воздействием на конструкции различных динамических факторов. Надёжность и долговечность строительных элементов шахты, таких как крепления выработок, подпорные стены, армирующие элементы и перекрытия, напрямую влияют как на экономические показатели, так и на жизнь и здоровье персонала. В таких условиях необходимость повышения уровня обоснованности проектных и эксплуатационных решений способствует развитию методов прогнозирования, учитывающих случайный характер нагрузок, свойств материалов и дефектов эксплуатации [1,2].

Традиционные инженерные подходы опираются на детерминированные расчёты с введением коэффициентов запаса. Однако это зачастую приводит либо к завышению стоимости за счёт "перестраховки", либо к недоучёту индивидуальных рисков. В последние десятилетия всё более широкое распространение получают стохастические модели, позволяющие математически описывать процессы с учётом их вероятностной природы.

Классификация стохастических моделей для анализа строительных конструкций/ Различают несколько основных классов стохастических моделей, применяемых при анализе надёжности конструкций:

– стохастические модели элементарных характеристик. здесь случайными считаются отдельные параметры: например, прочность материала крепи или коэффициент сцепления между элементами определяется случайной величиной с известным/предполагаемым распределением.

–процессы случайных возмущений. во многих случаях, например, при внезапных выбросах метана или горных ударах, нагрузки действуют как случайные импульсы во времени. для таких воздействий используют модели случайных процессов, например, пуассоновские потоки или процессы с независимыми инкрементами.

– модели деградации состояния. для оценки остаточного ресурса конструкции применяют процессы, описывающие постепенное разрушение или износ (например, винеровский или орнштейновский процессы) [3].

Математические основы анализа

Как правило, задача расчёта надёжности требует оценки вероятности превышения некоторой критической области (области отказа) в пространстве случайных параметров системы.

Пусть случайный вектор параметров состояния конструкции обозначим как $X=(X_1,X_2,...,X_n)$, и имеется функция предельного состояния g(X), которая задаёт разграничение между работоспособным ($g(X)>0$) и отказавшим ($g(X)\leq 0$) состояниями.

Тогда вероятность отказа вычисляется по формуле:

$$P_f = P(g(X) \leq 0) = \int_{g(X)\leq 0} f_x(x)dx$$

где $f_X(x)$ — функция плотности распределения случайного вектора параметров.

При сложных функциях g(X) или большом числе случайных переменных данный интеграл аналитически не вычисляется, поэтому используют численные методы — например, метод Монте-Карло или приближённые инженерные методы (FORM/SORM, методы важности и т.п.) [4].

Пример:

Пусть для конкретного участка шахты нагрузка на крепление Q и прочность R являются независимыми нормально распределёнными величинами (см. предыдущий математический пример). Функция предельного состояния $g(X)=R-Q$. В данном случае одномерное интегрирование (т.е. оценка вероятности $P(R-Q\leq 0)$) возможно аналитически (см. выше). Для более сложных ситуаций (например, случайно изменяющиеся нагрузки во времени) решение будет строиться на основе моделирования. Применение моделей случайных процессов

Рассмотрим деградацию элементов крепи как стохастический процесс. Пусть X_t — остаточный ресурс элемента на момент времени t, который изменяется по закону

$$dX_t=-\alpha d_t+\sigma dW_t$$

Здесь $\alpha>0$ — средняя скорость деградации за счёт воздействия внешних факторов, σ — интенсивность случайных флуктуаций (например, вызванных неравномерностью выемки), W_t — стандартный винеровский процесс (броуновское движение).

Рассчитаем вероятность достижения "предела отказа" (например, полного износа) за время T при начальном ресурсе $X_0=x_0$:

$$\mathrm{P}(X_T \leq 0|X_0 = x_0|) = \Phi(\frac{0 - x_0 + \alpha T}{\sigma\sqrt{T}})$$

Обозначения:

X_t — состояние конструкции (например, остаточный ресурс, прочность или толщина) в момент времени t; $X_0=x_0$ — начальное значение ресурса элемента; α — средняя скорость деградации ресурса (потери прочности) со временем; σ — интенсивность случайных колебаний ресурса (вариабельность износа из-за случайных факторов); T — рассматриваемый промежуток времени (срок службы, интервал до следующего осмотра); W_t — винеровский процесс (стандартное броуновское движение), описывающее случайные флуктуации; Φ(z) — функция стандартного нормального распределения, то есть вероятность того, что нормально распределённая случайная величина с нулевым средним и единичной дисперсией примет значение меньше z.

Данная формула позволяет по математическим параметрам конструкции и среде эксплуатации вычислить вероятность того, что к моменту T она полностью утратит несущую способность [5].

Вариация для оценки остаточного ресурса с учётом мониторинга:

– позволяет учитывать не только усреднённое поведение конструкции, но и экстремальные (маловероятные, но опасные) сценарии;

– делает возможным индивидуальный подход к каждому объекту с персонализированной

оценкой риска;

– позволяет оптимизировать интервалы инспекций и ремонтов с учётом реального риска;

– интегрируется с системами интеллектуального анализа больших данных (Big Data, AI), открывая путь к полностью автоматизированным системам управления безопасностью.

Если в процессе эксплуатации осуществляется регулярный сбор данных о величине ресурса (например, по напряжению в элементах крепи), параметры модели можно уточнять по поступающим данным, корректируя вероятностные прогнозы (адаптивные стохастические модели).

Заключение

Использование стохастических моделей при анализе состояния конструкций угольных шахт позволяет более комплексно учитывать все многообразие нагрузок и влияющих факторов, а также повысить точность прогнозирования надежности и долговечности конструкций. Математическое применение вероятностных подходов, таких как нормальное распределение параметров прочности и нагрузки, стохастические дифференциальные уравнения, марковские цепи, пуассоновские процессы и имитационное моделирование методом Монте-Карло, оказывается практически значимым для оценки состояния и оптимизации эксплуатации шахтных конструкций. Перспективное развитие данного подхода связано с накоплением больших объёмов эксплуатационных данных, а также внедрением интеллектуальных цифровых платформ управления промышленной безопасностью.

Список литературы

1. *Абдуллазянов Э.Ю., Сабитов Л.С., Попов А.О., Гарькин И.Н.* Геотехнический расчет влияния строительства объектов энергетики на окружающую застройку//Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2025. Т. 17. № 1 (65). С. 3-9

2. *Лобов И.М., Ступина А.Э., Гарькин И.Н., Ахтямова Л.Ш.* Архитектурное формирование строительных производственных комплексов на базе недействующих угольных шахт (на примере Донбасса)//Региональная архитектура и строительство. 2024. № 3 (60). С. 207-213.

3. *Железняков А.А., Гарькина И.А.* Математическое моделирование при решении ряда практических задач // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2025. – № 2(57). – С. 134-139

4. *Бережной Д.В., Сабитов Л.С., Гарькин И.Н., Секаева Л.Р., Михеев В.В.* Решение обратной задачи Штурма - Лиувилля при восстановлении скоростных характеристик квазибесконечной струны // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2024. № 1 (47). С. 71-76.

5. *Сабитов Л.С., Коноплев Ю.Г., Бережной Д.В.* Влияние конструктивных особенностей взаимодействующей с грунтом телескопической опоры на ее прочность на этапах ее возведения и эксплуатации // Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 1 (288). С. 44-51.

1.2.2.

[1]И.А. Гарькина, [2]Л.Ш. Ахтямова, [3]Л.И. Киямова, [4]Ф.Ф. Фазыльзянов

[1]Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза,
[2]Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань,
[3]Российский университет дружбы народов, Москва,
[4]Московский государственный строительный университет, Москва,

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ

Предлагается математическая модель процессов деградации материалов объектов культурного наследия. Приводится система дифференциальных уравнений, описывающая взаимодействие факторов разрушения; проводится анализ устойчивости критических точек. Даются аналитические выражения для динамики деградации; рассматриваются оптимальные стратегии консервации объектов.

Ключевые слова: *математическое моделирование, динамические системы, процессы деградации материалов, объекты культурного наследия, консервация.*

Постановка задачи

Сохранение объектов культурного наследия [1…3] представляет собой комплексную задачу, требующую глубокого понимания физико-химических процессов деградации материалов. Традиционные подходы к анализу разрушения основываются на эмпирических наблюдениях, однако современные вызовы в области консервации требуют более точных предиктивных моделей.

Применение математического аппарата теории динамических систем позволяет создать универсальную модель, описывающую эволюцию состояния объекта во времени с учетом множественных факторов воздействия. Такой подход открывает возможности для количественного прогнозирования процессов деградации объектов и оптимизации мероприятий по их консервации [4…6].

Под состоянием объекта (системы) будем понимать совокупность таких значений переменных, знание которых, наряду с входными функциями и уравнениями, описывающими динамику системы, позволяет определить её будущее состояние и выходную переменную. Вектор состояния системы – это минимальный набор координат, однозначно определяющих состояние системы в любой конкретный момент времени. Пространство состояний — один из основных методов описания поведения динамической системы во временной области. В пространстве состояний создаётся модель динамической системы, включающая набор переменных входа, выхода и состояния, связанных между собой дифференциальными уравнениями первого порядка. Эта система дифференциальных уравнений первого порядка и представляет собой основу математической модели многомерной динамической системы (уравнение состояния).

Состояние объекта культурного наследия описывается вектором фазовых переменных:

$$\mathbf{x} = \left(x_1, x_2, x_3, x_4\right)^{\mathrm{T}},$$

x_1 - структурная целостность материала ($0 \le x_1 \le 1$),

x_2 - влажность материала (%),

x_3 - концентрация агрессивных веществ (мг/м³),

x_4 - эффективность защитных покрытий ($0 \le x_4 \le 1$).

Уравнение состояния объекта описывается следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx_1}{dt} = -\alpha_1 x_1 (1 + \beta_1 x_2^2 + \gamma_1 x_3) + \delta_1 x_4 x_1,$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \alpha_2 (H_0 - x_2) - \beta_2 x_2 x_4 + \gamma_2 \sin(\omega t + \varphi),$$

$$\frac{dx_3}{dt} = \alpha_3 x_2 - \beta_3 x_3 + \gamma_3 P(t),$$

$$\frac{dx_4}{dt} = -\alpha_4 x_4 (1 + \beta_4 x_2 + \gamma_4 x_3^2) + u(t);$$

параметры модели имеют следующие значения:

α_1 = 0,015 день$^{-1}$ (базовая скорость деградации),

β_1 = 2,3 (коэффициент влияния влажности),

γ_1 = 0,8 (коэффициент химической агрессии),

δ_1 = 0,12 (эффективность защиты),

α_2 = 0,25 (скорость влагообмена),

H = 65% (равновесная влажность),

β_2 = 0,18 (эффективность влагозащиты),

γ_2 = 15% (амплитуда сезонных колебаний),

$\omega = 2\pi/365$ день$^{-1}$ (частота годового цикла),

α_3 = 0,04 (скорость образования агрессивных веществ),

β_3 = 0,08 день$^{-1}$ (скорость нейтрализации),

α_4 = 0,02 день$^{-1}$ (скорость деградации покрытий),

$u(t)$ - функция управления (мероприятия по консервации).

Стационарные состояния объекта находятся из условия

$$\frac{dx}{dt} = 0.$$

Решая систему алгебраических уравнений при $u(t) = 0$ и $P(t) = P_0 = const$, получаем критические точки.

Точка равновесия без деградации $\left(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*\right)$:

$$x_1^* = \frac{\delta_1 x_4^*}{\alpha_1 \left(1 + \beta_1 \left(x_2^*\right)^2 + \gamma_1 x_3^*\right) - \delta_1 x_4^*},\ x_2^* = \frac{\alpha_2 H_0 + \gamma_2 \sin(\omega t + \varphi)}{\alpha_2 + \beta_2 x_4^*},$$

$$x_3^* = \frac{\alpha_3 x_2^* + \gamma_3 P_0}{\beta_3},\ x_4^* = \frac{\sqrt{\beta_3 - \alpha_3 x_2^* - \gamma_3 P_0}}{\gamma_4 \beta_3}.$$

Матрица Якоби системы в критической точке имеет вид:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{x_4} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \end{bmatrix}.$$

Частные производные:

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = -\alpha_1\left(1 + \beta_1 x_2^2 + \gamma_1 x_3\right) + \delta_1 x_4,\ \frac{\partial f_1}{\partial x_2} = -\alpha_1 x_1\left(2\beta_1 x_2\right),\ \frac{\partial f_1}{\partial x_3} = -\alpha_1 x_1 \gamma_1,\ \frac{\partial f_1}{\partial x_4} = \delta_1 x_1;$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_1} = 0,\ \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = -\alpha_2 - \beta_2 x_4,\ \frac{\partial f_2}{\partial x_3} = 0,\ \frac{\partial f_2}{\partial x_4} = -\beta_2 x_2;$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial x_1} = 0,\ \frac{\partial f_2}{\partial x_2} = \alpha_3,\ \frac{\partial f_2}{\partial x_3} = -\beta_3, \frac{\partial f_3}{\partial x_4} = 0;$$

$$\frac{\partial f_4}{\partial x_1} = 0,\ \frac{\partial f_4}{\partial x_2} = -\alpha_4 x_4 \beta_4,\ \frac{\partial f_4}{\partial x_3} = -\alpha_4 x_4\left(2\gamma_4 x_3\right), \frac{\partial f_4}{\partial x_4} = -\alpha_4\left(1 + \beta_4 x_2 + \gamma_4 x_3^2\right).$$

Характеристическое уравнение:

$$\det\left(J - \lambda I\right) = 0.$$

Собственные значения:

$\lambda_1 = -0{,}187 \pm 0{,}043i$, $\lambda_2 = -0{,}095$, $\lambda_3 = -0{,}312$, $\lambda_4 = -0{,}156$

определяют устойчивость (собственные значения имеют отрицательные вещественные части, критическая точка устойчива).

Динамика потери структурной целостности определяется как:

$$V = \int_0^T \frac{\partial x_1}{\partial t}\, dt = \int_0^T \alpha_1 x_1\left(1 + \beta_1 x_2^2 + \gamma_1 x_3\right) dt - \int_0^T \delta_1 x_4 x_1\, dt.$$

Для периодических решений (T = 365 дней):

$$V \approx \alpha_1 \bar{x}_1\left(1 + \beta_1 \bar{x}_2^2 + \gamma_1 \bar{x}_3\right) T - \delta_1 \bar{x}_4 \bar{x}_1 T,$$

$\bar{x}_i$ - средние значения за период.

Рассмотрим каменную кладку XV века с начальными условиями:

$x_1(0) = 0{,}75$ (умеренная деградация),

$x_2(0) = 45\%$ (повышенная влажность),

$x_3(0) = 120$ мг/м³ (загрязнение),

$x_4(0) = 0{,}3$ (низкая защита).

Расчет без консервационных мероприятий ($u(t) = 0$):

Численное интегрирование методом Рунге-Кутта 4-го порядка с шагом $\Delta t = 0{,}1$ день дает следующие результаты через 5 лет ($t = 1825$ дней):

$x_1(1825) = 0{,}234$ (критическая деградация),

$x_2(1825) = 67{,}3\%$ (высокая влажность),

$x_3(1825) = 186$ мг/м³ (сильное загрязнение),

$x_4(1825) = 0{,}089$ (практически отсутствие защиты).

Динамика потери целостности - $V = 0{,}516$ за 5 лет.

Задача оптимального управления формулируется как минимизация функционала:

$$J = \int_0^T \left[q_1 (1 - x_1)^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + q_4 (1 - x_4)^2 + r u^2 \right] dt ,$$

$q_1 = 10, q_2 = 0{,}01, q_3 = 0{,}001, q_4 = 5, r = 2$ - весовые коэффициенты.

Оптимальное управление найдено методом принципа максимума Понтрягина:

$$u^*(t) = \frac{1}{2r} \frac{\partial H}{\partial u} = \frac{1}{4} \lambda_4(t),$$

$\lambda_4(t)$ - сопряженная переменная, удовлетворяющая уравнению:

$$\frac{d\lambda_4}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_4} = -2q_4(1 - x_4) + \lambda_1 \delta_1 x_1 + \lambda_2 \beta_2 x_2 + \lambda_4 \alpha_4 (1 + \beta_4 x_2 + \gamma_4 x_3^2).$$

При оптимальном управлении через 5 лет будем иметь:

$x_1(1825) = 0{,}687$ (сохранение 91,6% от исходного состояния),

$x_2(1825) = 52{,}1\%$ (контролируемая влажность),

$x_3(1825) = 95$ мг/м³ (снижение загрязнения),

$x_4(1825) = 0{,}78$ (высокий уровень защиты).

Динамика потери целостности в этом случае - $V = 0{,}063$ за 5 лет (снижение в 8,2 раза).

Стоимость консервационных мероприятий найдется:

$$C = \int_0^T (c_1 u(t) + c_2 u^2(t)) dt ,$$

$c_1 = 150$ руб/день (линейные затраты), $c_2 = 50$ руб/день (квадратичные затраты).

Для оптимального управления: C = 487500 руб. за 5 лет.

Экономический эффект от предотвращения ущерба:

$E = (V - V_{опт}) \cdot S \cdot P = (0{,}516 - 0{,}063) \cdot 500 \cdot 25000 = 5662500$,

$S = 500$ м² - площадь объекта, $P = 25000$ руб/м² - стоимость реставрации.

Чистый экономический эффект:

5662500 - 487500 = 5175000 руб.

Выводы

Приведенная математическая модель демонстрирует эффективность описания процессов деградации материалов объектов культурного наследия. Численные расчеты показывают, что применение оптимальной стратегии консервации позволяет снизить скорость потери целостности в 8,2 раза при экономической эффективности более 1000%.

Анализ устойчивости критических точек выявил существование двух режимов: режима контролируемой деградации при активных консервационных мероприятиях и режима лавинообразного разрушения при их отсутствии. Переход между режимами носит характер бифуркации типа седло-узел, что подтверждает необходимость превентивных мер консервации.

Периодические колебания влажности, описываемые функцией $\sin(\omega t + \varphi)$, создают резонансные эффекты в системе, усиливающие процессы деградации в определенные сезоны года. Математический анализ показывает максимальную уязвимость объектов в весенне-осенний период, что согласуется с практическими наблюдениями.

Список литературы

1. *Гарькин И.Н.* Историко-архитектурная ценность объектов культурного наследия: методика оценки, пофакторный и историко-генетический анализ // Региональная архитектура и строительство. - 2025. - № 1 (62). - С. 192-199.
2. *Данилов А.М., Гарькина И.А.* Системы и модели: имитационное моделирование сложных систем // Информатика и системы управления. - 2024. - № 2 (80). - С. 18-31.
3. *Гарькин И.Н., Сабитов Л.С., Киямова Л.И., Гарькина И.А., Глебова Т.А.* Стохастическая модель процесса развития повреждений на объектах культурного наследия // Научно-технический вестник Поволжья. - 2025. - № 5. - С. 24-26.
4. *Гарькин И.Н., Гарькина И.А., Кудишина А.Э.* Оценка эффективности мониторинга состояния объектов культурного наследия // Моделирование и механика конструкций. - 2025.- № 21. - С. 167-172.

1.2.2.

[1]Д.А. Киряков, [1]Н.М. Труфанова

[1]Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет,
кафедра конструирования и технологии в электротехнике,
Пермь, kiryakov17fsj@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В БУРОВОЙ СКВАЖИНЕ

Бурение в высокотемпературных породах связано с риском перегрева инструментов, что требует точного прогнозирования тепловых режимов. Существующие модели часто не учитывают взаимное влияние температуры и теплофизических свойств породы, а также реальную структуру буровой колонны. Цель работы — разработка математической модели тепломассопереноса в стволе скважины с учётом этих факторов. Модель основана на законах сохранения и реализована с помощью метода конечных элементов в ANSYS. Разработанная математическая модель позволяет анализировать тепломассоперенос течения бурового раствора. В результате были получены температурные поля для прямого и обратного потоков, что важно для оптимизации режимов бурения и предотвращения тепловых повреждений оборудования.

Ключевые слова: *буровая скважина, тепломассоперенос, буровой раствор, математическая модель, ANSYS FLUENT.*

Буровые скважины — ключевой элемент добывающей и инженерной инфраструктуры, обеспечивающий доступ к подземным ресурсам. Исследование тепломассопереноса в них критически важно для повышения эффективности эксплуатации.

Процессы тепломассопереноса включают взаимодействие между породой, буровым раствором и воздухом. Изучение влияния бурового раствора, его плотности и скорости потока на распределение температуры в скважине имеет важное значение для предотвращения выхода из строя буровых инструментов в условиях высоких температур.

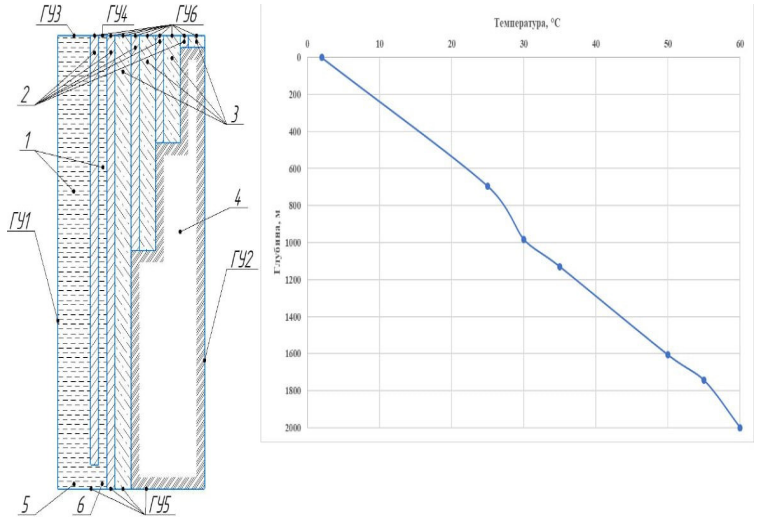
Оптимизация этих процессов способна повысить производительность и снизить эксплуатационные затраты за счёт подбора оптимальных режимов работы. Математическое моделирование позволяет прогнозировать температурные поля в скважине.

Постановка задачи. Буровая скважина содержит: зону подачи бурового раствора; зону выкачивания бурового раствора; цементную заливку; кондуктор; 1-ую промежуточную колонну; 2-ую промежуточную колонну; эксплуатационную колонну; колонну бурильных труб.

Теплоноситель подается от устья скважины и двигаясь по колонне бурильных труб достигает нижней точке на глубине 2000 м, после чего, поднимается обратно к устью по затрубному пространству между бурильной и эксплуатационной колоннами. Циркуляция бурового раствора направлена на вынос выбуренных пород и охлаждения бурильного инструмента во избежание его преждевременного выхода из строя.

На рис. 1(а) представлена геометрическая модель геотермальной скважины, диаметр в зоне подачи бурового раствора составляет 108,62 мм, в зоне выхода бурового раствора диаметр равен 149,92 мм.

При математическом моделировании процессов тепломассопереноса в буровой скважине были приняты следующие допущения: задача осесимметричная, стационарная; на границе раздела разнородных сред задавалось условие идеального теплового контакта; на твердых поверхностях задавались условия прилипания и не проникновения для скоростей; теплофизические свойства всех сред и реологические свойства бурового раствора постоянны; вынос на поверхность выбуренных пород и тепловой поток от долота не учитываются.



а) б)

Рис. 1 – а) Схематическое представление скважины в продольном сечении с установленными граничными условиями включает в себя следующие элементы: 1 – буровой раствор; 2 – трубы СБТ (кондуктор, 1-ая промежуточная колонна, 2-ая промежуточная колонна, эксплуатационная колонна, колонна бурильных труб); 3 – цементная заливка; 4 – грунт; б) Геотерма

Разработанная математическая модель движения и теплопереноса в скважине основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии с учетом сделанных допущений в осесимметричной постановке.

Полная система дифференциальных уравнений, описывающая течение и теплообмен в каналах скважины для турбулентного и ламинарного режимов течения приведена в статьях [1-2].

Зависимости плотности, теплоемкости и теплопроводности бурового раствора от температуры приведены в статье [3].

Таблица 1 – Теплофизические свойства материалов

Материал	Плотность, $\frac{кг}{м^3}$	Теплоемкость, $\frac{Дж}{кг* °С}$	Теплопроводность, $\frac{Вт}{м*°С}$
Грунт	2000	1000	0,305
Сталь	7830	440	48
Цемент	2300	720	1,2

Система дифференциальных уравнений замыкалась граничными условиями, приведенными в таблице 2.

Таблица 2 – Граничные условия

Обозначение	Назначение
ГУ1	Ось симметрии
ГУ2	Геотерма
ГУ3	На входе в колонну задавалась эпюра скоростей для теплоносителя, соответствующая объемному расходу равному 30 л/с и температура равная 20 °С
ГУ4	Статическое давление
ГУ5	Температура 60 °С
ГУ6	Конвективный теплообмен, температура 5 °С, коэффициент теплоотдачи 30 Вт/(м2·°С)

Выделенные контрольные точки: №1 – точка в забое скважины в зоне подачи бурового раствора (см. рис. 1(а), п. 5), №2 - точка в забое скважины в зоне выхода бурового раствора (см. рис. 1(а), п. 6).

Результаты. В результате решения поставленной задачи были получены поля температур во всем объеме скважины.

На рис. 2(а) представлено распределение температуры по глубине в зоне подачи раствора для турбулентного и ламинарного течения. При турбулентном течении температура в устье скважины равна 20°С, а значение температуры в контрольной точке №1 составляет 28°С. Далее наблюдается незначительное снижение температуры из-за влияния охлаждающего эффекта породного массива с последующим ростом до 26,1°С. Для ламинарного течения температура в устье скважины равна 20°С, а значение температуры в контрольной точке №1 составляет 20,23°С. Незначительный прирост температуры связан с отсутствием перемешивания слоев и с высокой скоростью подачи раствора.

На рис. 2(б) представлено распределение температуры в зоне выкачивания раствора для турбулентного и ламинарного течения. При ламинарном течении по мере поднятия раствора с забоя скважины температура монотонно возрастает до 27 °С. Это обусловлено слоистостью ламинарного течения, а также тем, что канал обратного потока расположен ближе к нагретому грунту. Для турбулентного режима наблюдается обратная зависимость - температура снижается до 20°С из-за интенсивного перемешивания слоев.

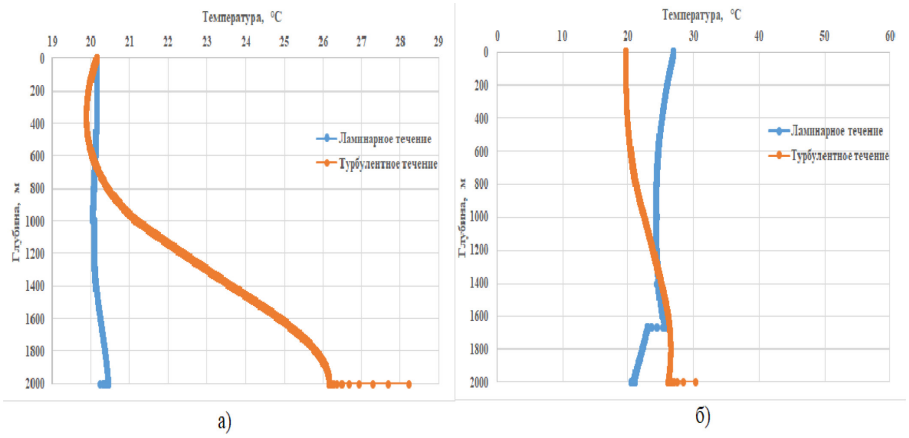


Рис. 2 – Распределение температуры при ламинарном и турбулентном течении: а) в зоне подачи теплоносителя; б) в зоне выкачивания бурового раствора

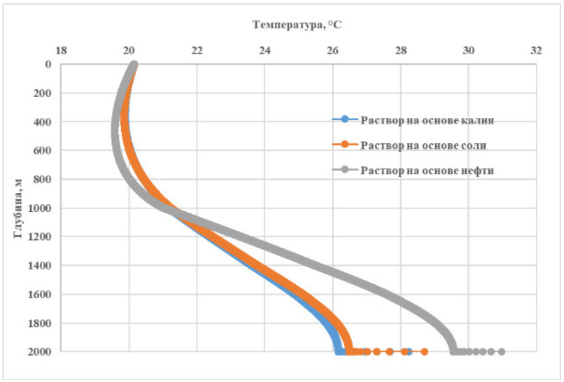


Рис. 3 – Распределение температуры в зоне подачи теплоносителя для различных растворов

На рис. 3 приведены результаты распределения температур в зоне подачи бурового раствора для различных основ. Во всех случаях характер распределения аналогичен. Максимальная температура 30,97°С наблюдается при использовании нефтяного раствора. Буровой раствор на основе калия демонстрирует более низкую температуру в забое скважины, она составит 28,23 °С, использование раствора на основе соли относительно раствора на основе калия дает незначительный прирост температуры в забое на 1,67% (28,71°С). Так как мы стремимся к снижению температуры в забое скважины, более оптимальный вариант - использовать раствор на основе калия.

На рис. 4 представлены температурные поля, соответствующие раствору на различных основах. Они имеют общий характер, но раствор на основе нефти имеет более высокую температуру в забое, что повышает риск перегрева оборудования. Растворы на основе калия и соли отличаются на 1,6 °С в зоне забоя скважины. При выборе раствора на основе соли необходимо учитывать усиление коррозии металла, что может привести к повреждению оборудования.

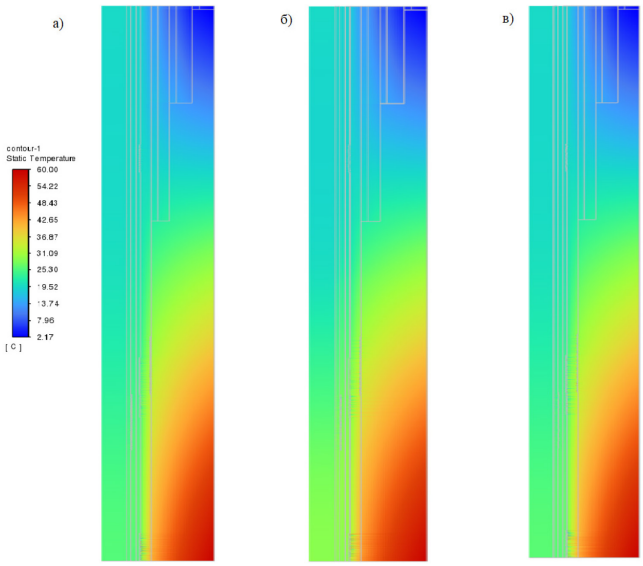


Рис. 4 – Поля температур для различных растворов: а) на основе калия; б) на основе нефти; в) на основе соли

Заключение. Исследование показало, что выбор режима течения бурового раствора влияет на распределение температуры. Турбулентное течение обеспечивает более эффективный перенос тепла за счет вихревых структур и перемешивания слоев. Максимальное отличие по температуре для двух видов течения составило 6°С. В результате проведенных исследований, удалось установить, что раствор на основе калия является наиболее оптимальным для снижения температуры в забое скважины (28,23°С). Раствор на основе нефти демонстрирует наивысшую температуру (30,97°С), что повышает риск перегрева оборудования, а раствор на основе соли, хотя и имеет незначительный прирост температуры (28,71°С), может усиливать коррозию металла. Для дальнейших исследований выбран раствор на основе калия.

Список литературы

1. *Goltsov E., Kostarev N., and Trufanova N.* Modeling of the Heat and Mass Transfer Process in Assessing the Thermal Effect When Processing an Oil Well with a Hot Coolant Through Hollow Rods // Proceedings of the International Russian Automation Conference, RusAutoCon2022, September 4–10, 2022, Sochi, Russia – Vol. 986 – P.166–175.
2. *Костарев Н.А.* Численное моделирование процессов тепломассопереноса в нефтяной скважине с греющим кабелем: дис. … канд. техн. наук. – Пермь, 2021. – 103 с.
3. *Liangjie Mao, Yilun Liu, Changjiang Wei, Xuefeng Chen, Sen Yang.* Temperature prediction of geothermal drilling considering the drilling fluid // Renewable Energy, Volume 237, Part A, December 2024, 121489.

1.2.2.

[1]Л.М. Ковальчук, [2]А.А. Комлев, [1]Т.В. Бурнышева, [1]Н.В. Пустовой

[1]Новосибирский государственный технический университет,
факультет летательных аппаратов, кафедра прочности летательных аппаратов,
Новосибирск, tburn@mail.ru,
[2]Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
Новосибирск

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДБОРА ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕБЕРНОЙ СТРУКТУРЫ АНИЗОГРИДНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Представлен программный модуль, разработанный на языке Python 3.11, который взаимодействует с комплексом ANSYS. Модуль предназначен для подбора реберной структуры анизогридных оболочек при рациональном проектировании и расчете напряженно – деформированного состояния конструкций, их устойчивости и жесткости.

Ключевые слова: *язык Python 3.11, ANSYS, напряженно – деформированное состояние, устойчивость конструкции, жесткость конструкции.*

Анзогридные конструкции из композитного материала используются в качестве силовых корпусов космических аппаратов. Сетчатые структуры оболочек образуются пересечением спиральных и кольцевых ребер путем намотки [1]. Данный тип конструкций обладает не только высокими прочностными характеристиками, но и жесткостными.

При рациональном проектировании сетчатых оболочек необходимо учитывать технологические особенности производства [2]. Подбор рациональных значений параметров конструкций данного типа с учетом фиксированной или не постоянной массы может быть осуществлен, в том числе с использованием многофакторного вычислительного эксперимента. Для того чтобы сократить время расчета необходимо провести автоматизацию вычислений геометрических и структурных параметров сетки.

Программный модуль был разработан на языке программирования Python 3.11. Входными параметрами выступали геометрические параметры реберной структуры исходной конструкции, физико – механические характеристики материала, шаг варьирования значений геометрических параметров сечения ребер, угол наклона спирального ребра к образующей и число пар спиральных ребер оболочки.

Расчет значений параметров осуществлялся в несколько этапов. Рассмотрим алгоритм на примере конструкции с постоянной массой [3].

На первом этапе для каждого семейства ребер вычисляется масса, которая в дальнейшем учувствует в расчете геометрических параметров. Меняя число пар спиральных ребер, угла наклона спирального ребра к образующей и один из параметров торцевого сечения, рассчитывается другой геометрический параметр сечения ребра. Блок-схема расчет геометрических параметров ребер показана на рис.1.

На втором этапе реализуется вычислительный эксперимент: определяются диапазоны значений и шаг варьируемых параметров с учетом технологии производства, функции отклика. Далее значения варьируемых параметров передаются на вход в программный модуль PyMAPDL [4] и визуализируются сформированные модели (рис.2).

На третьем этапе данные о модели оболочки передаются в программном комплексе ANSYS [5], где осуществляется расчет напряженно-деформированного состояния конструкции при приложенной нагрузке, ее расчет на устойчивость и жесткость.

После обработки и анализа результатов численного расчета выбираются самые прочные, устойчивые и жесткие конструкции. Для этого задаются ограничения на прочность, жесткость и устойчивость сетчатых оболочек.

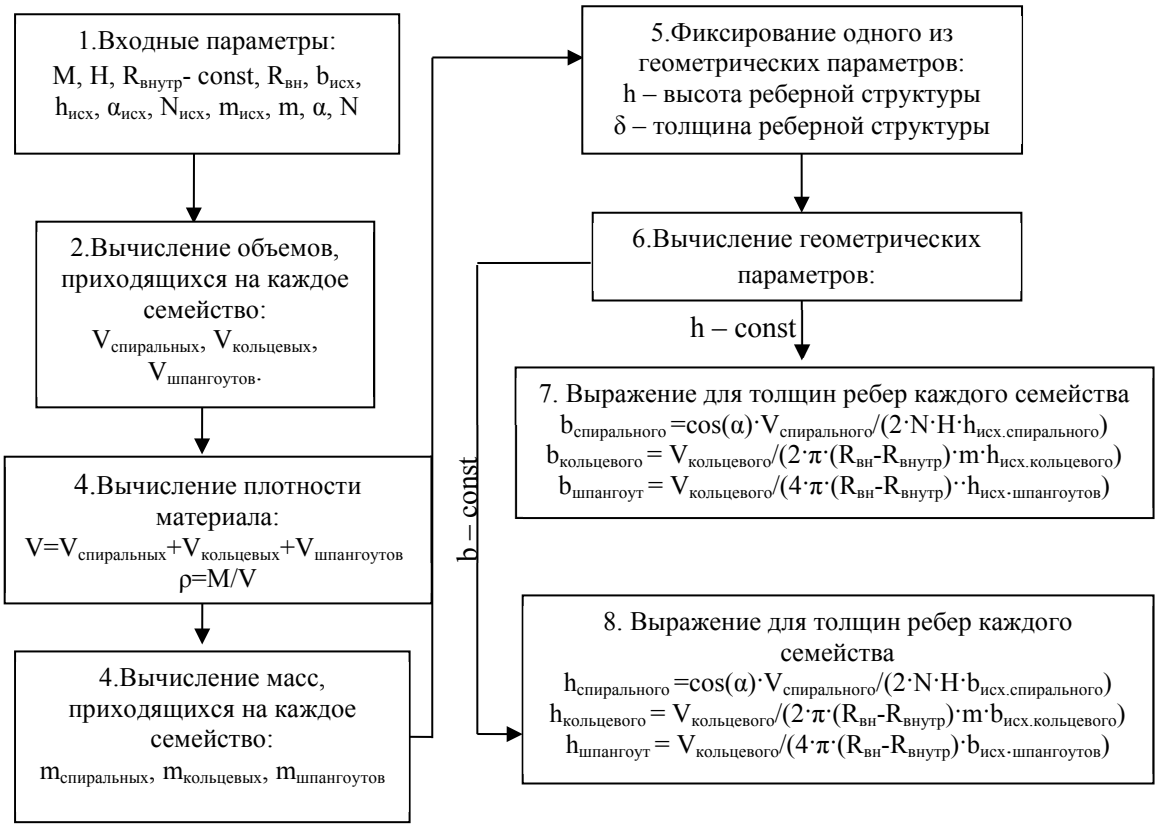


Рис. 1 - Блок – схема расчет геометрических параметров ребер
(M – постоянная масса конструкция; H – высота конструкции; $R_{внут}$ – внутренний радиус конструкции; $R_{вн}$ – внешний радиус конструкции;
$b_{исх}$ – толщина реберной структуры исходной конструкции,
$h_{исх}$ высота реберной структуры исходной конструкции, $\alpha_{исх}$ – угол наклона спирального ребра к образующей, $N_{исх}$ – число пар исходной конструкции, $m_{исх}$ – число кольцевых ребер исходной конструкции; N – число пар спиральных ребер при вычислительном эксперименте, α – угол наклона спирального ребра к образующей при вычислительном эксперименте;
m – число кольцевых ребер)

а) б)

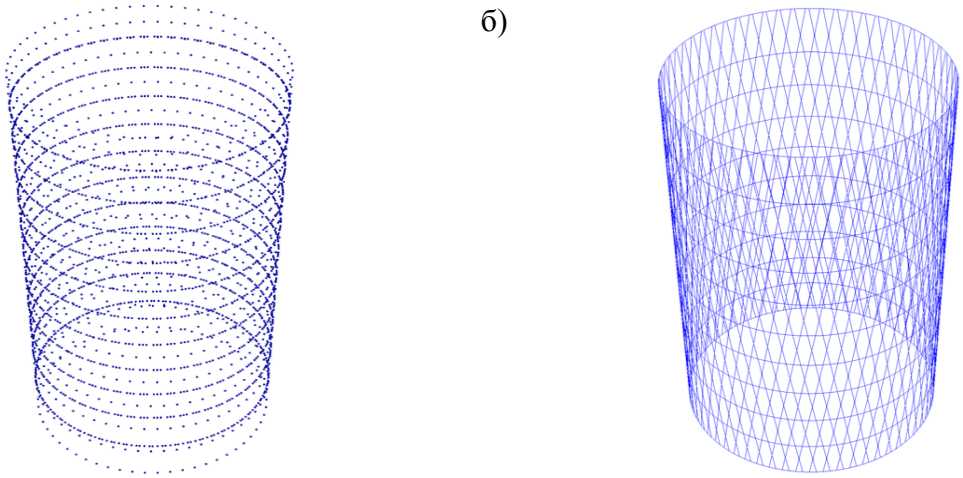


Рис. 2 - Результат работы программного модуля
а – построение узлов; б – модель анизогридной конструкции

На рис. 3 представлена схема автоматизации процесса моделирования и расчета анизогридных конструкций на прочность, устойчивость и жесткость с учетом рационального проектирования реберной структуры.

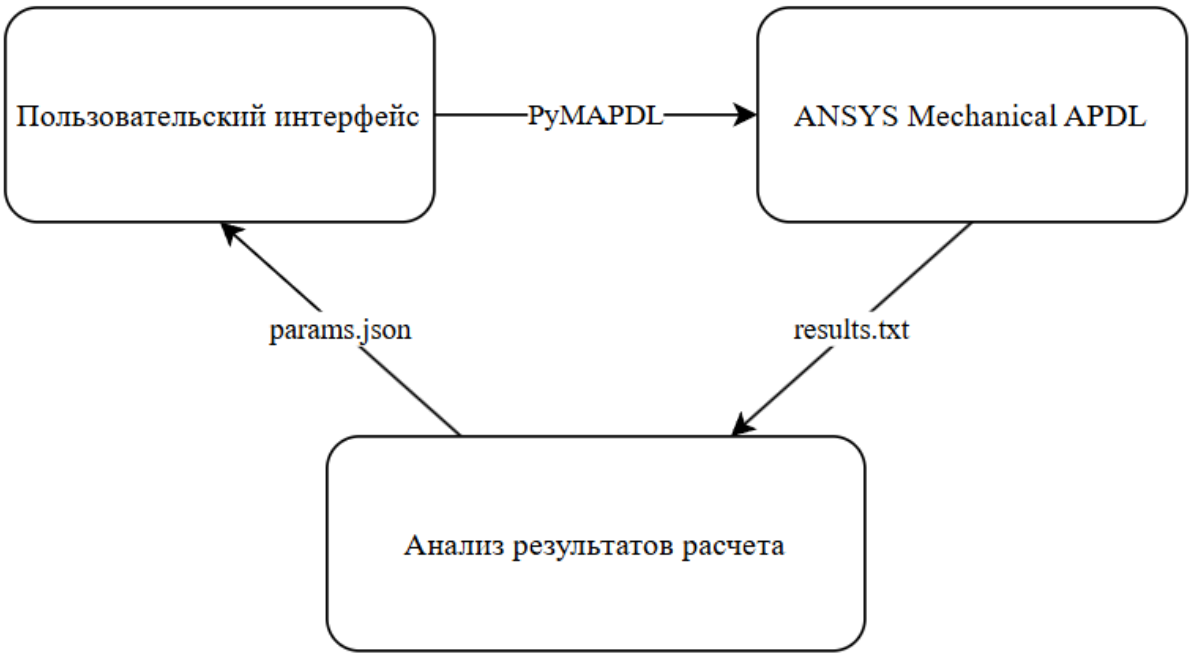


Рис. 3. Блок – схема автоматизации процесса моделирования и расчета анизогридных конструкций на прочность, устойчивость и жесткость с учетом программного модуля PyMAPDL

В разработанном модуле реализован алгоритм выбора сетчатой оболочки с наименьшей массой и заданными ограничениями на геометрические и структурные параметры реберной сетки с учетом технологического процесса изготовления. Данный модуль позволяет значительно сократить время расчета значений геометрических и структурных параметров сетки на стадии проектирования конструкции.

Список литературы

1. *Васильев В.В.* Механика конструкций из композиционных материалов [Текст] / *В.В. Васильев*. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.

2. *Васильев В.В., Разин А.Ф., Азаров А.В.* Композиционные сетчатые конструкции – проектирование, расчет и изготовление. М.: Инновационное машиностроение, 2023. 488 с.: ил.

3. *Kovalchuk L.M.* Investigation of the stress state and assessment of the stability of an anisogrid cylindrical shell when changing the parameters of the rib structure under static loading / L. M. Kovalchuk, T.V. Burnysheva. – DOI 10.1134/S1063784223700081. – Text : direct // Technical Physics. – 2023. – Vol. 68, iss. 10. – P. 328–335.

4. Qt for Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://doc.qt.io/qtforpython-6/, свободный

5. Learning PyMAPDL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mapdl.docs.pyansys.com/version/stable/getting_started/learning.html, ограниченный.

1.2.2.

А.А. Корелин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет,
кафедра конструирование и технологии в электротехнике,
Пермь, korelin-art@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СТЕПЕНЬ СШИВКИ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В работе представлена пространственная математическая модель процесса тепломассопереноса при вулканизации полиэтиленовой изоляции. В результате численной реализации модели методом конечных объемов получены поля температур, скоростей и степени сшивки изоляции при её прохождении в трубе вулканизации. Проведена оценка влияния предварительного нагрева токопроводящей жилы на распределение температуры и степени сшивки в готовой изолированной жиле.

Ключевые слова: *математическая модель, степень сшивки, полиэтиленовая изоляция.*

Современный рынок кабельно-проводниковой продукции, включая материалы для их производства, направлен на снижение затрат на изготовление. Одними из условий достижения указанной цели в случае производства кабелей с сшиваемой полиэтиленовой изоляцией является анализ влияния кинетических и теплофизических свойств полимерно-сшиваемых материалов и технологических параметров процесса сшивки в вулканизационной трубе. В работе использован метод математического моделирования процессов тепломассообмена при сшивки полиэтиленовой изоляции в вулканизационной трубе с последующим охлаждением. Приближенные решения подобных задач [1-2] не позволяли в полной мере оценить качество получаемой изоляции.

Постановка задачи. Геометрическая модель с расстановкой граничных условий представлена на рисунке 1. Общая длина линии составляет 184 метра. Длина зоны нагрева 68 метров, длина зоны охлаждения 116 метров.

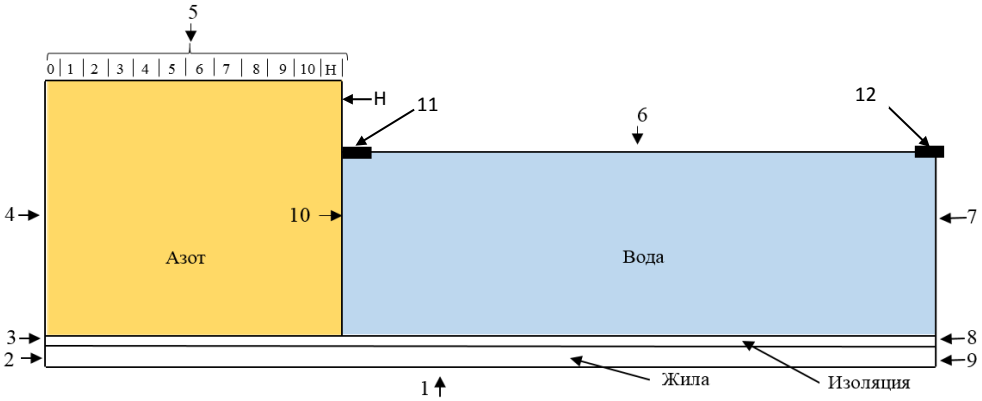


Рис. 1 – Схема линии вулканизации в продольном сечении и расстановка граничных условий: *1* – ось симметрии*; 2*, *9* – токопроводящая жила*; 3, 8* – изоляция; *4, 7, 10* – стенки трубы; *5, 6* – температурные зоны трубы; *12* - точка подачи воды; *11* - точка вывода воды

Упрощающие предположения, сделанные в работе: наклонная геометрия трубы заменяется на горизонтальную; теплофизические свойства материалов изолированной жилы постоянны; на границах раздела разнородных сред реализуется условие идеального теплового контакта; тепло, выделяемое в процессе сшивки не учитывается; характер течения сред внутри трубы – ламинарный.

С учетом сделанных допущений решаемая система дифференциальных уравнений представлена в следующем виде:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \upsilon_z}{\partial z}+\frac{1}{r}\frac{\partial \upsilon_\theta}{\partial \theta}+\frac{1}{r}\frac{\partial\left(r\cdot\upsilon_r\right)}{\partial r}=0$$

Уравнение Буссинеска

$$\rho_i(T)=\rho_0\left[1-\beta(T-T_0)\right]$$

Уравнения движения :

$$\rho_i\left(\upsilon_r\frac{\partial \upsilon_r}{\partial r}+\frac{\upsilon_\theta}{r}\frac{\partial \upsilon_r}{\partial \theta}-\frac{\upsilon_\theta^2}{r}+\upsilon_z\frac{\partial \upsilon_r}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\left(r\cdot\tau_{rr}\right)}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta}-\frac{\tau_{\theta\theta}}{r}+\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z}+\rho_i kg\beta\left(T-T_0\right)\sin\theta$$

$$\rho_i\left(\upsilon_r\frac{\partial \upsilon_\theta}{\partial r}+\frac{\upsilon_\theta}{r}\frac{\partial \upsilon_\theta}{\partial \theta}-\frac{\upsilon_\theta\cdot\upsilon_r}{r}+\upsilon_z\frac{\partial \upsilon_\theta}{\partial z}\right)=-\frac{1}{r}\frac{\partial P}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial\left(r^2\cdot\tau_{r\theta}\right)}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta}+\frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z}+\rho_i kg\beta\left(T-T_0\right)\cos\theta$$

$$\rho_i\left(\upsilon_r\frac{\partial \upsilon_z}{\partial r}+\frac{\upsilon_\theta}{r}\frac{\partial \upsilon_z}{\partial \theta}+\upsilon_z\frac{\partial \upsilon_z}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial z}+\frac{1}{r}\frac{\partial\left(r\cdot\tau_{rz}\right)}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

Уравнения физические:

$$\begin{cases}\tau_{rr}=2\mu_i\dfrac{\partial \upsilon_r}{\partial r} & \tau_{r\theta}=\mu_i\left(r\dfrac{\partial}{\partial r}\left(\dfrac{\upsilon_\theta}{r}\right)+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \upsilon_r}{\partial \theta}\right)\\ \tau_{\theta\theta}=2\mu_i\left(\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \upsilon_\theta}{\partial \theta}+\dfrac{\upsilon_r}{r}\right) & \tau_{rz}=\mu_i\left(\dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial r}+\dfrac{\partial \upsilon_r}{\partial z}\right)\\ \tau_{zz}=2\mu_i\dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial z} & \tau_{\theta z}=\mu_i\left(\dfrac{\partial \upsilon_\theta}{\partial z}+\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \upsilon_z}{\partial \theta}\right)\end{cases};$$

Уравнение энергии для воды и азота:

$$c_i\rho_i\left(\upsilon_r\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\upsilon_\theta}{r}\frac{\partial T}{\partial \theta}+\upsilon_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\lambda_i\nabla^2 T$$

Уравнения энергии для изолированной жилы:

$$c_{из}\rho_{из}\upsilon_z\frac{\partial T}{\partial z}=\lambda_{из}\nabla^2 T$$

$$c_{тпж}\rho_{тпж}\upsilon_z\frac{\partial T}{\partial z}=\lambda_{тпж}\nabla^2 T$$

$$\nabla^2=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2}{\partial \theta^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

где ρ – плотность, кг/м^3; c – теплоёмкость, Дж/кг·°С; λ – коэффициент теплопроводности Вт/м·°С; μ – вязкость, Па·с; r, z – координаты цилиндрической системы; υ_r, υ_z – компоненты вектора скорости, м/сек; τ_{rr}, τ_{zz}, τ_{rz} – тензоры напряжений; T – температура, °С; i – индекс исследуемой области: *1* – среда азота, *2* – среда воды; (при i = 2, k = 0); *ТПЖ* – индекс исследуемого материала жилы; *из* – индекс исследуемого материала изоляции.

Приведённая система дифференциальных уравнений замыкается следующими граничными условиями, геометрическое положение которых представлено на рис. 1: позиция 1, – центр токопроводящей жилы является осью симметрии; 2 – начальная температура токопроводящей жилы (70 °С); 3 – температура экструдированной полиэтиленовой изоляции – 120 °С; на стенках труб 4 и 7 – температура, равная температуре соответствующей зоны; на поверхности стенки 5 и 6 – температура по зонам, в соответствии с температурным режимом; на разделяющей две области (нагрева и охлаждения) стенке 10 адиабатические условия по температуре. На всех твердых стенках задаются кинематические условия

прилипания и непроникновения. В трубе охлаждения задается массовый расход воды – 11 и 12, где через границу 12 втекает вода с температурой 40 °С, а через стенку 11 вытекает. Расход воды в трубе равен 10,44 м^3/час. На границах 8 и 9 задаются адиабатические условия по температуре. Изолированная жила имеет заданную скорость 0,4 м/с, а на её поверхности задается условие идеального теплового контакта.

Результаты решения. В работе рассматривалась алюминиевая токопроводящая жила сечением 150 мм^2 и толщиной изоляции 6,7 мм. Режим нагрева зоны вулканизации и теплофизические свойства материалов приведены в статье [3]. Для выбранной марки кабеля были получены поля температур и степени сшивки. На рис. 2 приведены поля температур в нескольких поперечных сечениях по длине вулканизационной трубы.

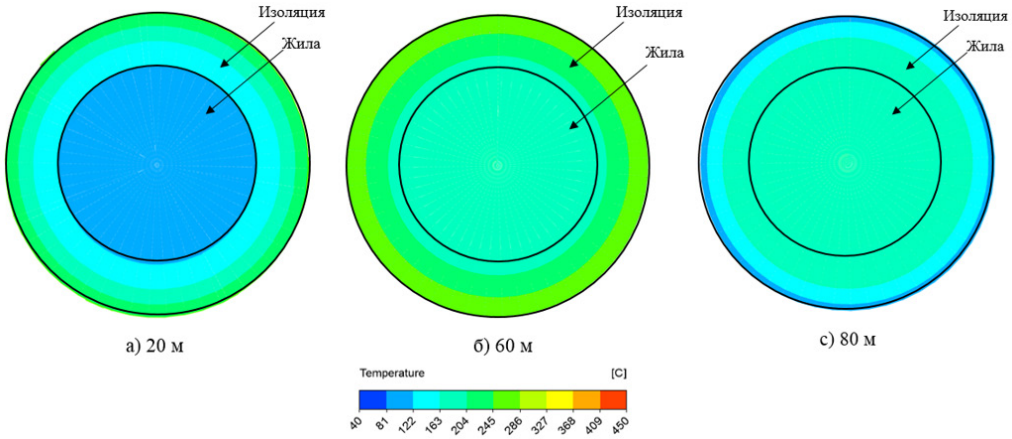


Рис. 2 – Поле температур в поперечном сечении изолированной жилы: а) на длине 20 м; б) 60 м; с) 80 м

Из рисунка 2 видно, что интенсивность прогрева изоляционного слоя, неоднородна по толщине. Очевидно, что такое распределение температуры в изоляции приводит к неравномерности процесса сшивки. Нужно отметить, что процесс сшивки продолжается и в зоне охлаждения до тех пор, пока температура в изоляции не станет ниже 140°С и его интенсивность зависит от технологических параметров.

На основе полученных полей температур используя регрессионное выражение для определения степени сшивки, предложенное автором в работе [3], построены поля степени сшивки полимерного материала во всем исследуемом объеме. На рис. 3 представлены зависимости величины степени сшивки по длине вулканизационной трубы и зоны охлаждения при различных значениях радиуса изоляционного слоя.

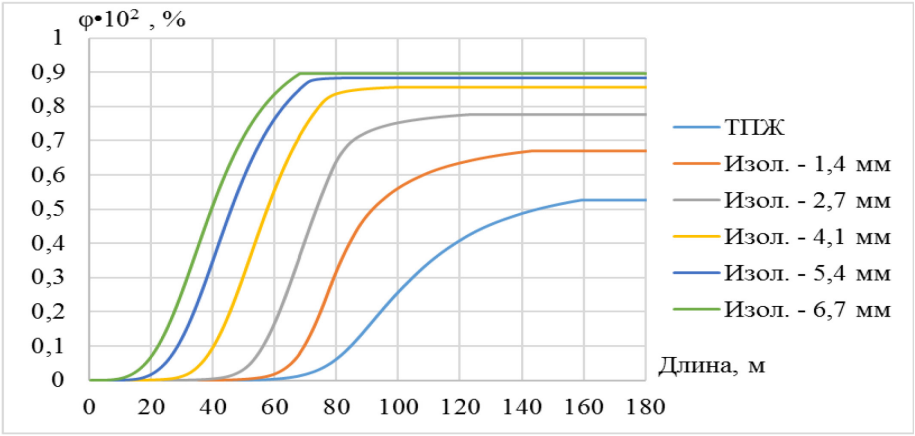


Рис. 3 – Распределение степени сшивки по толщине изолированной жилы вдоль линии вулканизации

Очевидно, что неоднородное распределение температуры в изоляционном слое влияет на процесс вулканизации. На длине 70 м степень сшивки достигает 90% в верхних слоях изоляции наиболее прогретых. В центральных слоях степень сшивки составляет порядка 60

%, а при рассмотрении внутренних слоев, ближе к поверхности ТПЖ, она кратно снижается и стремится к нолю. При данном технологическом режиме, к концу линии вулканизации, степень сшивки внутреннего слоя изоляции составит только 52%, что не допустимо по существующей нормативно-технологической документации.

Чтобы оптимизировать технологический режим, учитывая неравномерный прогрев, можно изменить величину предварительного нагрева жилы. Влияние температуры предварительного нагрева на степень сшивки показаны на рисунке 4.

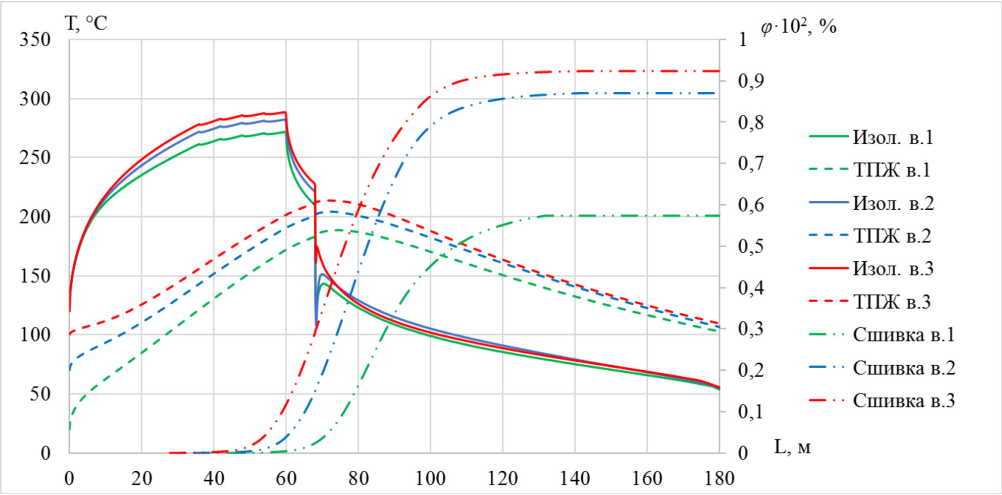


Рис. 4 – Распределение температуры на поверхности изоляции и токопроводящей жилы, и степени сшивки вдоль линии вулканизации: в.1 – При начальной температуре ТПЖ 20 °С; в.2 - При начальной температуре ТПЖ 70 °С; в.3 – При начальной температуре ТПЖ 100 °С

Изменение температуры предварительного нагрева жилы значительно влияет на конечную степень сшивки. Увеличение температуры нагрева, позволяет снизить время, необходимое на прогрев внутренних слоев изоляции. При отсутствии предварительного нагрева (20 °С) внутренние слои изоляции прогреваются до температуры начала вулканизации только на длине 50 метров, в то время как, используя предварительный нагрев, время прогрева изоляции значительно снижается. Прогрев жилы до 70 °С увеличивает конечную степень сшивки на 30 %. Таким образом, увеличение температуры предварительного нагрева позволяет оптимизировать технологический процесс вулканизации полиэтиленовой изоляции.

Вывод. Разработанная математическая модель процесса тепломассопереноса при вулканизации полиэтиленовой изоляции позволила получить и проанализировать распределение температуры и степени сшивки по толщины изоляционного слоя при прохождении трубы вулканизации. Показано существенное влияние предварительного подогрева заготовки на степень сшивки изоляции и в связи с этим возможность оптимизировать процесс производства кабелей со сшиваемой полимерной изоляцией.

Список литературы

1. *Кузнецов Г.В.*, *Иванова Е.В.* Математическое моделирование температурных полей в процессе вулканизации типичных кабельных изделий // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 38-41.

2. *Kosar, V., Gomzi Z.* Modeling of the power cable production line // Thermochimica Acta. – 2007. 457. p.70–82.

3. *Корелин, А.А., Труфанова, Н. М.* Анализ влияния кинетических и теплофизических характеристик полиэтилена при моделировании процесса пероксидной сшивки изоляции // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 50. – С. 5-22.

1.2.2.

[1,2]Ку Дык Тоан, [1,3]Нгуен Минь Хиеу, [1]Д.А. Ахметшин, [1]Н.К. Нуриев, [1]Е.А. Печеный, [2]Нгуен Ван Тхинь, [2]До Као Минь

[1]ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, toancdit@gmail.com,
[2]Вьетчиский индустриальный университет, Вьетнам, thinhnv@vui.edu.vn,
[3]Военно-морская академия, Вьетнам, hieukenvin01226778037@mail.ru

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА ДЛЯ РАСЧЁТА ЗОН ПОКРЫТИЯ WI-FI С УЧЁТОМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПРЕПЯТСТВИЙ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

В статье предложены математическая модель и алгоритм для расчёта зон покрытия Wi-Fi с учётом препятствий, таких как затухание сигнала и многолучевое распространение. Модель позволяет прогнозировать уровень сигнала и улучшать размещение точек доступа.

Ключевые слова: *математическая модель, алгоритм, радиосигнал, Wi-Fi, препятствия*

В работе рассмотрена задача прогнозирования зон покрытия Wi-Fi в помещениях с учётом затухания и отражения сигналов от статических и динамических препятствий. Отмечено, что существующие модели (Hata, COST 231, ITU-R P.1238) недостаточно учитывают особенности внутренних помещений [1–3]. Предложена математическая модель и вычислительный метод, позволяющие оценивать покрытие с учётом многолучевого распространения и динамических факторов для рационального размещения точек доступа и повышения эффективности беспроводных сетей.

Моделирование распространения электромагнитных волн можно начать с классического уравнения Фрисса для свободного пространства:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - 20\log_{10}(d) - 20\log_{10}(f) - 32{,}44,$$

где P_r – получаемая мощность (дБм); P_t – мощность передатчика (дБм); G_t, G_r – усиления антенн передатчика и приемника (дБи); d – расстояние между ними (м), f – частота сигнала (ГГц). Однако для помещений такая модель неадекватна.

В статье рассматриваются основные факторы, влияющие на затухание Wi-Fi сигнала в помещениях: потери при прохождении через препятствия (стены, стекло и др.), многолучевое распространение (Multipath Fading) и динамические помехи (люди, движущиеся объекты). Для расчёта потерь в внутренних помещениях используется модифицированная модель ITU-R.

$$PL = PL_0 + 10n\log_{10}\left(d / d_0\right) + \sum_{i=1}^{K} L_i,$$

где PL – общие потери на маршруте (дБ); PL_0 – потери на расстоянии d_0 (обычно 1 метр); n – индекс затухания среды (обычно для офисов — 2 до 4); d – расстояние до передатчика; L_i – дополнительные потери на прохождение препятствий.

Классификация препятствий, влияющих на распространение Wi-Fi сигнала, включает статические (стены, перегородки, окна, мебель) и динамические (люди, движущиеся двери). Экспериментальные данные показывают характерные потери сигнала: бетонная стена (20 см) — $L_{бетон} = 12 - 18$ дБ; кирпичная стена — 7–12 дБ; офисная перегородка — 3–5 дБ; стекло

— 2–6 дБ; офисная мебель (шкафы) — 1–3 дБ; человек — 1–4 дБ. Затухание сигнала на препятствиях, наряду с мощностью передатчика, является ключевым фактором при проектировании беспроводных сетей в помещениях, требующим учёта свойств различных материалов и конструкций. Для оценки затухания часто используют модель ITU-R P.1238-10, согласно которой уровень сигнала, получаемый на некотором расстоянии от точки доступа, рассчитывается по формуле:

$$L = L_0 + 10n.\log_{10}(d) + \sum L_w,$$

где L – общий путь затухания; L_0 – начальное затухание (чаще всего рассчитывается для 1 метра); n – коэффициент затухания среды; d – расстояние от передатчика; L_w – суммарное затухание на препятствиях (стены, двери и т.д.).

В таблице 1 приведены типичные значения затухания для различных материалов. Для анализа зон покрытия Wi-Fi с использованием следующих параметров: точка доступа расположена в центре помещения, разделённого стенами из различных материалов; мощность передатчика составляет 20 дБм; начальное затухание (L_0) на первом метре — 40 дБ; коэффициент затухания среды (n) — 3,0; минимальный уровень сигнала для устойчивой связи — -70 дБм. Эти данные служат основой для дальнейших расчётов. Пример расчёта для сценария с одним препятствием (в таблице 2).

Таблица 1 – Значения затуханий наиболее распространённых препятствий

Материал	Частота, ГГц	Затухание, дБ (на 1 препятствие)
Гипсокартонная стена	2,4	3,0
Кирпичная стена	2,4	5,0
Железобетонная стена	2,4	10,0
Деревянная дверь	2,4	2,5
Стеклянная дверь	2,4	2,0
Офисная мебель	2,4	1,0
Окно	2,4	1,5

Таблица 2 – Суммарное затухание сигнала на расстоянии

Расстояние, м	Материал препятствия	Количество препятствий	Суммарное затухание L_w, дБ	Общий уровень сигнала, дБм
5	Гипсокартон	1	3.0	-35.3
10	Кирпич	1	5.0	-54.5
15	Железобетон	1	10.0	-80.5

Расчёт сигнала проводится по формуле выше. Например, на расстоянии 10 м с одной кирпичной стеной: L = 40 + 10.3.$\log_{10}(10)$ + 5 = 40 + 30 + 5 = 75 дБ (затухание). Мощность на приёмнике: 20 - 75 = -55 дБм (округлено). В работе представлена диаграмма покрытия Wi-Fi в помещении, отражающая влияние различных препятствий на уровень сигнала. Максимальный сигнал наблюдается в центральной зоне (0–10 м, без препятствий), с умеренным снижением при прохождении через гипсокартон, значительным — через кирпич, и резким — через железобетон.

Математическая модель и алгоритм расчёта. Для построения аналитической модели покрытия Wi-Fi на плане этажа (например, офисного помещения) вводится координатная сетка. Для любой ячейки сетки рассчитывается суммарное затухание на пути: $P_r(x,y) = P_t + G_t + G_r - PL(x,y)$,

где $PL(x,y)$ – вычисляется на основе минимального пути «от точки x, y до источника радиосигнала», включая пересчёт всех препятствий на этом пути.

Для учёта динамических объектов во времени предлагается ввести вероятностную модель — например, суммарное затухание $L_{dyn}(t)$ моделируется случайным образом в зависимости от плотности и скорости движения объектов: $L_{dyn}(t) = \alpha.N_{people}(t) + \beta.N_{moving_objects}(t)$, где α, β – эмпирические коэффициенты.

Алгоритм расчёта зоны покрытия Wi-Fi, включающий следующие этапы: 1) моделирование плана здания с указанием источников Wi-Fi и материалов препятствий; 2) определение минимального пути от каждой дискретной точки к точке доступа; 3) суммирование потерь сигнала от статических препятствий с учётом их типа и толщины; 4) параметризация и усреднение влияния динамических объектов на пути сигнала; 5) расчёт результирующей мощности сигнала с сопоставлением пороговому уровню (-70 дБм для устойчивого соединения); 6) визуализация карты покрытия с использованием цветовой шкалы (от зелёного — уверенный приём, до красного — отсутствие сигнала). Алгоритм обеспечивает автоматизированный анализ для проектирования беспроводных сетей.

Численный пример. Пусть задано помещение 20 × 20 метров, точка доступа Wi-Fi ($P_t = 20$ дБм, $G_t, G_r = 3$ дБи, $f = 2400$ МГц) расположена в центре; на пути к одной из точек стоят две кирпичные стены и находится один человек. Вычислим потери: Потери сигнала на 10 метрах (для $n = 3$, офис):

$$PL_0 = 20\log_{10}(2{,}4 \cdot 10^3) - 20\log_{10}(1) - 27.55 \approx 40 \text{ дБ};$$

$$PL(10) = PL_0 + 10.3.\log_{10}(10) = 40 + 30 = 70 \text{ дБ}$$

Потери на кирпичных стенах: 2 × 10 = 20 дБ; Потери от одного человека: ~2 дБ; Итого суммарные потери: 70 + 20 + 2 = 92 дБ; Получаемая мощность на приёмнике: $P_r = 20 + 3 + 3 - 92 = -66$ дБм.

В данной работе представлены результаты моделирования зон покрытия Wi-Fi с учетом влияния статических и динамических препятствий на основе модели ITU-R P.1238 и лабораторных данных на частоте 2,4 ГГц. Показано значительное затухание сигнала при прохождении через различные материалы: бетон (10 дБ), кирпич (5 дБ), гипсокартон (3 дБ), деревянные двери (2,5 дБ), а также снижение уровня сигнала из-за присутствия людей (до 2 дБ). Тепловая карта демонстрирует изменение уровня сигнала от –30 дБм до –90 дБм, с четким выделением зон ниже порога устойчивого соединения (–70 дБм). В правом нижнем углу помещения сигнал падает до –80…–90 дБм, что делает связь нестабильной. Для улучшения покрытия предложено рациональное размещение точки доступа и применение репитеров.

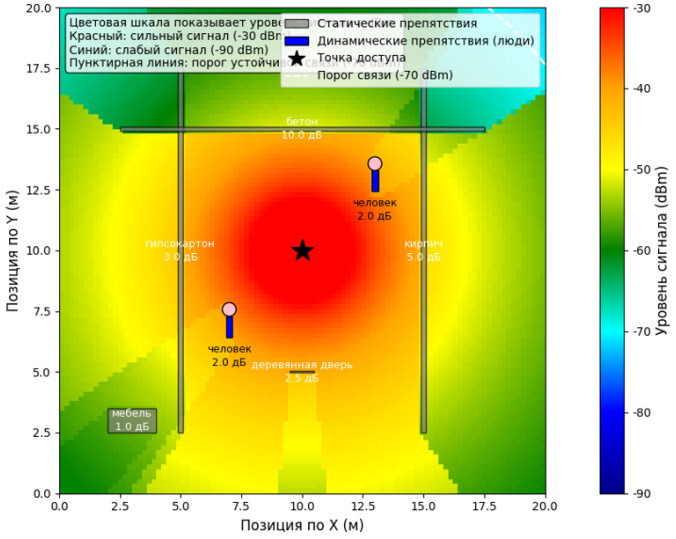


Рис. 1 – Уровень сигнала при моделировании распространения радиосигнала

Рис. 2 – Затухания сигнала Wi-Fi при наличии различных препятствий

На рис. 2 представлены значения затухания Wi-Fi сигнала (2,4 ГГц) при прохождении через различные препятствия по модели ITU-R P.1238 и лабораторным измерениям: бетон — 10 дБ, кирпич — 5 дБ, гипсокартон — 3 дБ, деревянные двери — 2,5 дБ, стеклянные двери — 2 дБ, окна — 1,5 дБ, мебель — 1 дБ (увеличивается при наличии металла). Затухание от людей составляет около 2 дБ, что подчеркивает необходимость учета динамических факторов при проектировании беспроводных сетей.

Выводы

Представлен метод моделирования Wi-Fi покрытия в помещениях с учётом статических и динамических препятствий, предназначенный для проектирования сетей и оптимального размещения точек доступа. Модель позволяет прогнозировать состояние сети в различных условиях и во времени. Дальнейшее развитие метода включает учёт частотных характеристик, сложных геометрий и применение эволюционных алгоритмов. Использование современных симуляторов повышает точность расчётов за счёт интеграции данных о перемещении людей.

Список литературы

1. ITU-R P.1238-10: Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz, 2019.

2. Расчеты и моделирование распространения радиоволн в помещениях для беспроводных сетей Wi-Fi // Вестник МГТУ, 2018.

3. *Clarke R.H.* A statistical theory of mobile radio reception // Bell Systems Technical Journal. July-August 1968. Vol. 47. Issue 6. P. 957–1000.

1.2.2.

С.Н. Матвеев, А.П. Дровосеков, К.А. Сорокин, П.В. Прокопчук

Набережночелнинский институт (филиал)
ФГАОУ «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,
Высшая Техническая Школа, кафедра математики,
Набережные Челны, semen967@rambler.ru

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АНАЛОГА МОДЕЛИ КЭЛИ-КЛЕЙНА НА КОНЕЧНОМ ПОЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ C#

В работе описывается процесс разработки программы, позволяющей производить вычисления в автоматическом режиме мест элементов в таблице полей Галуа и порожденных ими конечных проективных пространств. Моделируются элементы аналога модели Кэли-Клейна плоскости Лобачевского на проективной плоскости с конечным числом точек с разработкой автоматизации вычислений на языке программирования C#.

Ключевые слова: *поле Галуа, математический объект, проективная плоскость, объектно-ориентированный язык программирования, модель Кэли-Клейна.*

В качестве математической основы в работе рассматривается конечное поле Галуа: поле описывается количеством элементов в нём, которое представляет из себя число вида p^n, где p является любым простым числом, а n – любым натуральным. Конечное поле однозначно определяется количеством элементов, содержащихся в нём с точностью до изоморфизма [1]. В дальнейшем придерживаемся следующего содержания этого поля: в нём присутствуют нейтральный по сложению элемент – 0 (нуль); нейтральный по умножению элемент – 1 (единица); первообразный (примитивный) элемент $–A$. Первообразный элемент при возведении его в степень (показатель которой должен быть меньше $p^n - 1$) исчерпывает все ненулевые элементы поля. Благодаря этому свойству можно заявлять, что все элементы конечного поля, кроме нуля, образуют мультипликативную конечную группу (элементы поля можно делить друг на друга, а свободный выбор изначальной мультипликативной образующей A меняет лишь обозначения элементов поля, но не их сущность).

Для реализации описания поля Галуа вычисляем координаты каждого элемента конечного поля в базисе $\{A^2, A, 1\}$. Каждая из них может быть получена после проведения операций с примитивным элементом A и единицей. Таким образом, поле из p^3 элементов состоит из всех линейных комбинаций вида:

$$F = \{w \cdot A^2 + u \cdot A + v \cdot 1\}, \text{ где } w, u, v \in \mathbb{Z}_p.$$

Существует несколько способов нахождения координат элементов поля Галуа, но все они подразумевают взятие одного из элементов за простейший A^1 и присваивание значения единицы (нейтральной по умножению) элементу A^{p^3-1}, т.е. «последнему по порядку». Здесь мы придерживаемся следующего алгоритма: элементу A^k присваиваются следующие (неизвестные) координаты:

$$A^3 = \alpha \cdot A^2 + \beta \cdot A^1 + \gamma \cdot 1,$$

тогда $A^{k+2} = A \cdot (A^{k+1})$, то есть $u_{k+1} = \alpha u_k + v_k$, $v_{k+1} = \beta u_k + \gamma_k$, $w_{k+1} = \gamma u_k$, что можно выразить линейным оператором с матрицей [1]:

$$(A^k) = \begin{pmatrix} u_k & v_k & w_k \\ u_{k+1} & v_{k+1} & w_{k+1} \\ u_{k+2} & v_{k+2} & w_{k+2} \end{pmatrix}$$

После вычисления всех «условных» координат, используем для нахождения α, β и γ факт присвоения «последнему элементу» значения единицы $A^{p^3-1} = (0;\ 0;\ 1)$. Учитывая, что $u, v, w \in \mathbb{Z}_p$, т.е. имеют значение от нуля до $p - 1$, можно перебрать всевозможные линейные операторы.

Приняв $\{A^2, A, 1\}$, как базис векторного пространства, индуцируем проективные точки, как классы коллинеарных векторов. Так как поле имеет конечное число векторов, а, значит, количество проективных точек тоже конечно и равно $p^2 + 3$. Неоднородные координаты проективной точки (w, u, v) определяем в виде $\left(1; \frac{u_k}{w_k}; \frac{v_k}{w_k}\right)$. При этом выполняем операции по модулю p: если первая координата элемента в базисе $\{A^2, A, 1\}$ равна нулю, то получаем несобственную точку проективного пространства [2-4].

Например, полю с характеристиками $p = 7$, $n = 3$ соответствует таблица, приведённая ниже (рис.1).

w=0

6	172	176	323	316	338	241	300
5	58	224	62	127	209	186	202
4	115	184	259	119	243	281	266
3	286	95	110	72	290	88	13
2	229	31	15	38	298	233	53
1	1	129	70	167	145	152	5
0	∞	2	230	287	116	59	173
v/u	0	1	2	3	4	5	6

w=1

6	4	213	332	255	48	279	305
5	151	8	247	68	272	78	235
4	144	200	155	294	138	261	157
3	166	194	197	148	302	307	36
2	69	256	221	169	170	149	295
1	128	317	288	168	39	73	120
0	342	211	274	220	102	310	132
v/u	0	1	2	3	4	5	6

w=2

6	52	188	80	193	83	264	34
5	232	276	99	165	218	191	141
4	297	56	142	35	107	181	55
3	37	158	236	306	133	121	296
2	14	267	203	301	174	6	54
1	30	24	86	147	41	43	180
0	228	330	97	196	160	18	106
v/u	0	1	2	3	4	5	6

w=3

6	12	92	112	199	238	113	164
5	87	204	237	143	100	81	98
4	289	222	198	156	248	333	275
3	71	16	111	260	63	324	231
2	109	250	91	137	321	245	140
1	94	21	11	293	178	215	190
0	285	253	163	154	75	45	217
v/u	0	1	2	3	4	5	6

w=4

6	265	19	44	7	122	182	192
5	280	311	74	150	308	262	79
4	242	60	153	234	89	282	187
3	118	104	162	77	327	27	51
2	258	269	252	271	314	66	33
1	183	335	284	67	28	283	263
0	114	46	216	246	325	334	82
v/u	0	1	2	3	4	5	6

w=5

6	201	9	214	212	318	257	195
5	185	225	177	3	130	32	96
4	208	125	292	304	135	65	329
3	126	226	10	278	206	313	227
2	61	312	20	47	336	270	105
1	223	205	93	254	22	251	17
0	57	277	189	331	25	268	159
v/u	0	1	2	3	4	5	6

w=6

6	299	291	244	210	339	117	146
5	240	124	320	341	340	50	85
4	337	207	136	131	319	26	23
3	315	328	90	309	123	326	29
2	322	64	249	101	239	76	179
1	175	134	108	219	84	161	42
0	171	303	139	273	49	103	40
v/u	0	1	2	3	4	5	6

Рис. 1 - Элементы поля 7^3

Таблица составлена для мультипликативной образующей заданной матрицей:

$$(A) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 5 & 5 & 3 \end{pmatrix}$$

Далее на проективной плоскости ставится задача моделирования аналога модели Кэли-Клейна: требуется на плоскости задать овальную кривую и найти все внутренние точки, хорды и прямые пересекающие заданную кривую.

Алгоритм реализации перебора всех прямых с использованием программного обеспечения осуществляется таким образом: выбирается точка и составляются уравнения всех прямых, проходящих через эту точку по формуле:

$$(A, B) = \begin{vmatrix} x^1 & x^2 & x^3 \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{vmatrix} = 0.$$

Затем на плоскости задается (абсолют) овальная кривая уравнением:

$$x_1^2 + x_2^2 - x_3^2 = 0,$$

Определяются точки этой кривой, по знаку многочлена левой части определяем положение точек относительно заданного абсолюта. Внутренние точки примем как точки аналога модели плоскости Лобачевского. Внешние точки исключаются из дальнейшего рассмотрения. Определяем всевозможные существующие хорды – аналоги прямых модели.

Расстояние между двумя точками A и B в модели Кели-Клейна определяется сложным отношение:

$l(A, B) = \ln|(PQ; BA)|$, где P и Q – точки на абсолюте.

Имеется возможность рассмотреть на построенной модели простейшие фигуры, такие как окружность, орицикл и эквидистанта и т.д.

Здесь приведём построение аналога модели Кэли-Клейна для поля Галуа с конкретно заданными параметрами.

Программно алгоритм, позволяющий решать описанную задачу, был реализован с использованием языка программирования C#.

Был создан класс «VectorS» для записи, хранения и обработки векторов, имеющих размерность n – конкретных точек поля и проективного пространства.

Пример элемента массива класса «VectorS»:

arrRoot[i] = $\{x, y, z\}$, где i – номер корня; x, y, z – координаты

В программе создаётся двумерный массив, который является аналогом линейного оператора для реализации нахождения координат элементов поля. Так как встроенного инструментария языка программирования C# недостаточно для полноценной работы с матрицами, был создан собственный класс «MatricesOP», отвечающий за их обработку (рис.1).

```
static public MultiDimArray<int> CreateSpace(VectorS root, int p, int n)
{
    var field = new MultiDimArray<int>(n, p);

    var matrixLO1 = MatricesOP.CreateSingleMatrix(n, root);
    var matrixLO2 = MatricesOP.CreateSingleMatrix(n, root);

    var zero = new int[n];
    zero.Initialize();
    field.SetValue(zero, 0);

    for (int A = 1; A < Convert.ToInt32(Math.Pow(p, n)); A++) {
        if (A < n) field.SetValue(matrixLO2[A - 1], A);
        else {
            field.SetValue(matrixLO1[matrixLO1.Length - 1], A);
            matrixLO1 = MatricesOP.Multiplication(ref matrixLO1, ref matrixLO2, p);
        }
    }
    return field;
}
```

Рис. 2 - Алгоритм создания поля Галуа с известной первообразной

После получения данных о всех точках поля следует этап соотнесения их с прямыми. Прямые в программе представляются классом «Line».

Отдельно для работы с овальной кривой был создан класс «Curve», подразделяющий все точки поля Галуа и соответствующие им точки проективного пространства на лежащие внутри контура и на лежащие на самой кривой.

Класс «LineSelector» реализует метод «WorkLines», отвечающий за выбор точки и формирование списка всех прямых, проходящих через неё. Цикл перебирает все точки поля и соотносит их к соответствующим прямым (рис.2). В случае совпадения параметров с ранее полученными (вычисленными до рассмотрения этой точки), программа соотносит её к ранее построенной прямой. Иначе создаётся экземпляр класса, определяющий новую прямую.

```
VectorS vecState = _field.GetCoord(index);

for (int i = 1; i < _field.Length; i++) {
    if (i == index) continue;

    var galois = _field.GetCoord(i);
    var proj = projectiveStruct.Find(projective => projective.Contains(i))?.lambda;
    (VectorS galois, VectorS proj) point = (galois, proj);

    var x1 = vecState.GetValue(1) * galois.GetValue(2) - vecState.GetValue(2) * galois.GetValue(1);
    var x2 = vecState.GetValue(0) * galois.GetValue(1) - galois.GetValue(0) * vecState.GetValue(1);
    var x3 = vecState.GetValue(2) * galois.GetValue(0) - vecState.GetValue(0) * galois.GetValue(2);
    var equation = new VectorS([x1, x2, x3]);
    var line = lines.Find(x => x.EquationOfLine.Collinearity(equation));

    if (line == null) {
        line = new Line(equation);
        line.Add(i, point);
        lines.Add(line); }
    else line.Add(i, point);
}

return lines;
```

Рис. 3 - Реализация алгоритма соответствия прямых и точек

В рассматриваемом случае для поля Галуа с характеристиками $p = 7$, $n = 3$ и условным центром в точке $A^{24} = \{1, 1, 2\}$ после соотнесения прямых с точками проективного пространства и нахождения пересечений с овальной кривой получаем следующую таблицу 1:

Таблица 1 – Соотнесение пересечения прямых с овальной кривой

-1,2,0	**-2,5,-1**	**-3,8,-2**	**-4,9,-1**	**-1,1,1**	**-6,9,3**	**3,6,-12**	**5,-3,-7**	**5,-2,8**	**-1,4,-2**	**-1,6,-4**
0, 4	0, 6	5, 6	5, 1	0, 1	5, 6	5, 6	0, 4	0, 6	5, 1	0, 6
5, 4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
-3,4,2	**2,6,-10**	**4,-3,-5**	**4,-1,-7**	**6,-2,-10**	**-2,1,3**	**-1,9,-7**	**6,-1,-11**	**6,-5,-7**	**2,3,-7**	**1,9,-11**
0, 6	5, 1	0, 6	0, 4	5, 6	5, 1	5, 4	0, 6	0, 4	5, 4	5, 6
–	–	–	5, 4	–	–	–	–	–	–	–

В ячейках, выделенных серым цветом, записаны коэффициенты для уравнений всех прямых. Под ними – координаты точек проективного пространства, пересекающихся с овальной кривой и принадлежащих соответствующим прямым.

Итоговый интерфейс программы представляет окно (рис.3) с несколькими секциями и двумя полями ввода. Входными данными для программы выступают значения p, n и впоследствии выбранные пользователем корни.

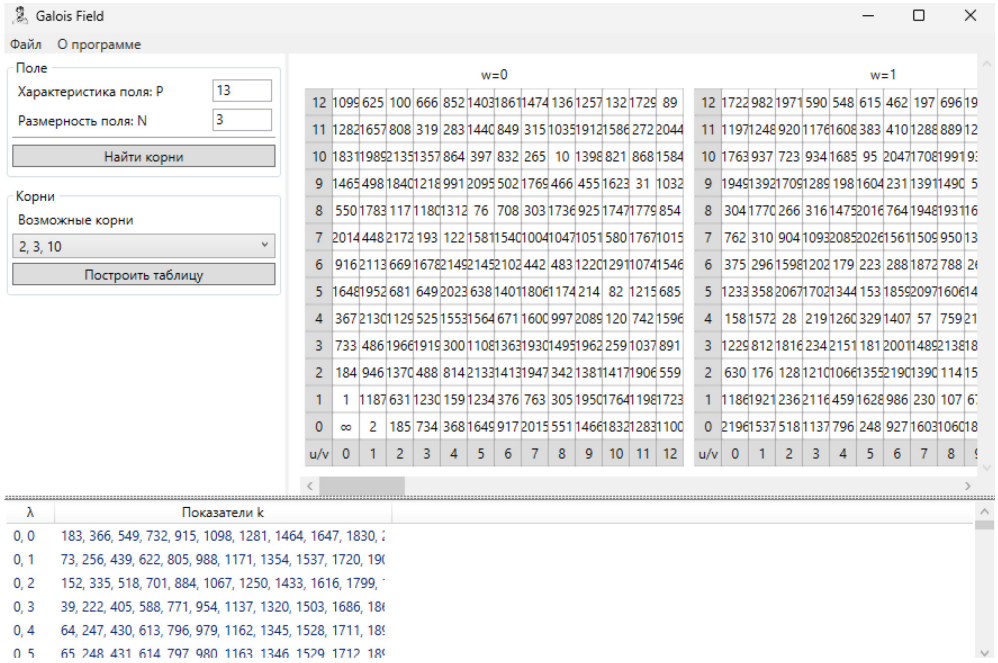


Рис. 4 - Интерфейс программы

Пользователю предлагается в выпадающем списке выбрать первообразную для получения соответствующей таблицы с координатами элементов поля Галуа и индуцированного проективного пространства.

Разработанная программа предоставляет инструмент для изучения некоторых моделируемых задач в проективном пространстве посредством интерактивного ввода характеристик изначального поля Галуа (конечного) и последующих операций над ним. ПО может быть использовано в образовательных целях и как основа для реализации более сложных алгоритмов.

Список литературы

1. *Арнольд В.И.* Динамика, статистика и проективная геометрия полей Галуа. М. МЦНМО, 2005. -72 с. – ISBN 5-94057-222-7

2. *Антропова Г.Р.* О некоторых способах построения поля Галуа и проективных пространств / Г.Р. Антропова, С.Н. Матвеев, Р.Г. Шакиров // Вестник Набережночелнинского государственного педагогического университета. - 2020. - №4(29). С.26-29. – Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=46400508

3. *Матвеев С.Н.* Модели конечной проективной прямой, индуцируемые полем Галуа / С.Н. Матвеев, Сиразов Ф.С. // Материалы Международной научно-практической конференции, посвящённой 25-летию факультета математики и информатики – Наб. Челны, 2015

4. *Матвеев С.Н.* Применение системы компьютерной алгебры «Maxima»в изучении конечных проективных прямых / С.Н. Матвеев, Сиразов Ф.С. // "Высшее образование сегодня", №7, М.: Издательская группа «Логос» – 2015 – ISSN 1726-667X

1.2.2.

С.Л. Моругин

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,
институт радиоэлектроники и информационных технологий,
кафедра Компьютерные технологии в проектировании и производстве,
Нижний Новгород, smorugin@yandex.ru

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОНТУРА ПО СВОЙСТВАМ СЕМЕЙСТВА КРИВЫХ

Цель исследования – рассмотреть адаптивный фильтр, который позволит уменьшить погрешность при восстановлении кривых из заранее заданного семейства и определить выбор порядка фильтра, оценить достижимую точность восстановления кривых семейства.

Показано, что использование главных компонент, выделяемых путем сингулярного разложения из матрицы, задающей семейство кривых, позволяет в несколько раз уменьшить погрешность восстановления контура плоского изображения по сравнению со сглаживающими фильтрами, использующие локальные области кривых для сглаживания.

Адаптивный фильтр может быть использован в системах компьютерного зрения при распознавании изображений по контурам, при решении задач увеличения масштаба изображения с сохранением качества контуров.

Ключевые слова: *контурный анализ, компьютерное зрение, семейство кривых, сингулярное разложение.*

Введение. Контурный анализ широко применяется при обработке и распознавании изображений [1]. Использование контура вместо полного изображения объекта существенно снижает вычислительную сложность алгоритмов при обработке. Ограничения контурного анализа связаны с искажениями, обусловленными плохой видимостью объекта, нарушениями целостности контура, отсутствием четкой границы при сходной яркости с фоном. Выделение контура из растрового изображения, особенно при низком разрешении последнего, приводит к погрешности пикселизации. Потеря четкости и ухудшение качества контура может быть критично для систем распознавания изображений и систем виртуальной реальности.

Цель данного исследования - разработка способа восстановления контура за счет использования заранее известных свойств семейства кривых, к которым относится обрабатываемый контур.

Восстановление контура на основе информации о свойствах семейства кривых позволяет в значительной степени устранить погрешности, связанные с пикселизацией, неточным нахождением границ контура, пропуском отдельных точек.

Под семейством кривых понимаем множество кривых, каждая из которых задаётся функцией или зависит от нескольких переменных параметров. Зависимость может быть задана неявно, алгоритмически, или представлена в виде набора контуров, заданных в численном виде в форме векторов. Влияние параметров на форму контура может выходить за пределы линейного преобразования.

Восстановление контуров. Каждый контур на плоскости XY представляется двумя кривыми $X=X(t)$, $Y=Y(t)$, $t\in[0,L]$, где L – длина контура. В дискретном представлении $t=k*s$, где k – номер точки контура с числом точек n от его начала ($k=1,\ldots,N$), s – расстояние по прямой между точками контура, если оно одинаково для всех отрезков.

Для численной обработки опишем контур двумя векторами, содержащими координаты X и Y точек кривых

$$X = \{x_1, x_2, \ldots, x_N\}; Y = \{y_1, y_2, \ldots, y_N\}.$$

Если мы имеем M контуров, то из их точек сформируем матрицу семейства кривых K размером $2M$ x N. Если не все компоненты матрицы K равнозначны по своему влиянию на среднюю погрешность восстановления кривых, мы можем сформировать обучающую матрицу K_0, введя веса кривых T_1 и их отдельных диапазонов точек в пределах них T_2

$$K_0 = T_1 K T_2,$$

где T_1 – $2M$x$2M$ диагональная матрица весов, задающая значимость тех или иных кривых в семействе, T_2 – NxN диагональная матрица весов, задающая значимость тех или иных точек на кривых.

В режиме обучения восстанавливающего фильтра главные компоненты [2] выделим из сингулярного разложения [3,4] матрицы K_0:

$$K_0 = U \Sigma V^T,$$

где V – NxN квадратная матрица, столбцы которой являются ортогональными единичными векторами длины N (правые сингулярные вектора);

Σ - прямоугольная диагональная матрица положительных чисел σ_k, называемых сингулярными значениями. Считаем, что эти значения отсортированы по неубыванию;

U – $2MxN$ матрица нормированных коэффициентов разложения векторов из K_0 по базису V.

Пусть некоторые кривые семейства S (пары векторов в количестве J) или их линейная комбинация искажены за счет ошибки пикселизации (округления координат до значения целого числа пикселей по осям X и Y.

$$X1 = F(X), Y1 = F(Y),$$

где $F(X)$ – функция, округляющая вещественные значения каждой компоненты вектора X, деленные на размер пикселя, до целого числа. Каждая точка контура будет привязана к центру пикселя.

В режиме восстановления кривых с использованием ранее выделенных матриц V и Σ проекция (коэффициенты разложения по базису V) возмущенных векторов $X1$, $Y1$ находится из соотношения

$$U1 = K_1 \cdot V_n, \quad (1)$$

где V_n – первые n столбцов матрицы V ($n<N$).

Примеры разложения семейств контуров и оценка погрешностей. Пример разложения для семейства S, представленного 100000-ми случайных нормированных контуров показан на рис.1. Каждый контур представляется двумя векторами X и Y размером 200.

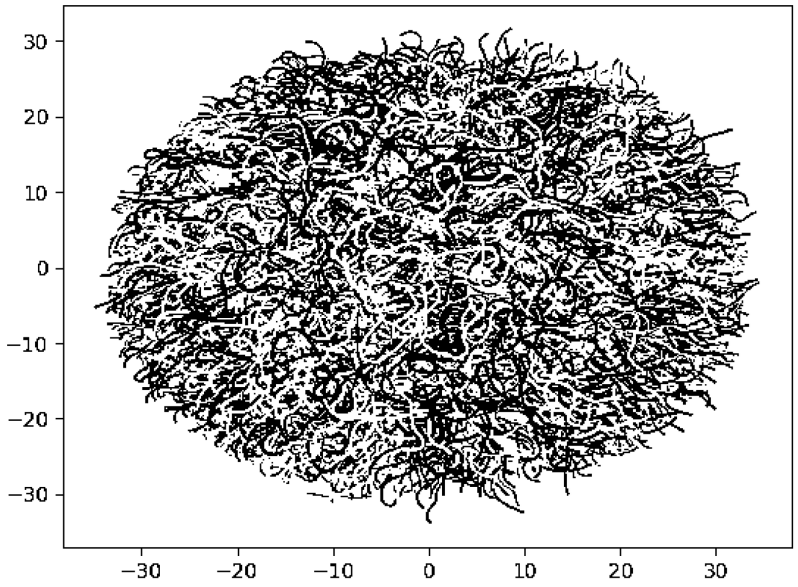


Рис. 1– Семейство S, представленное через 100000 нормированных по размерам контуров

На рис.2 показаны первые 6 компонент матрицы V_n. Компоненты разложения подстраиваются («обучаются») на множестве контуров, их вид зависит от способа генерации контуров семейства S и их характера.

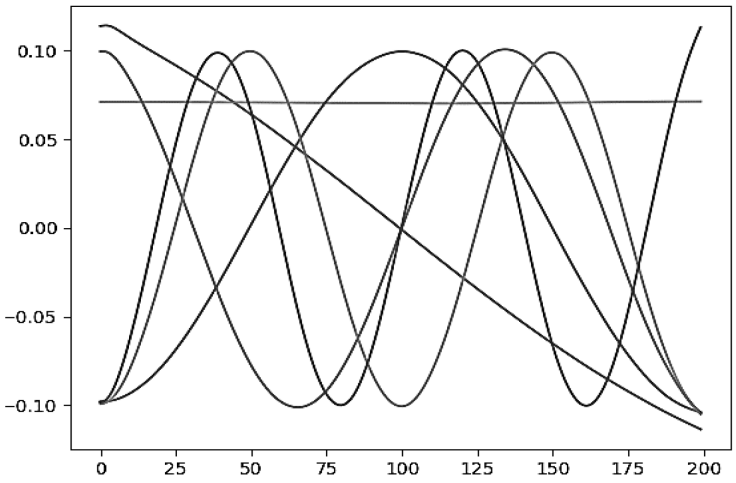


Рис. 2– Пример первых 6 сингулярных функций разложения семейства *S*

Обозначим K_2 – матрица из J восстановленных контуров (J=1,…), она находится в результате операции

$$K_2 = V_n^T K_1 V_n$$

Пример. Семейство контуров *S2* – комбинация (суперпозиция по X и по Y с разными случайными весами) эллиптических дуг с ломаными линиями (рис. 3).

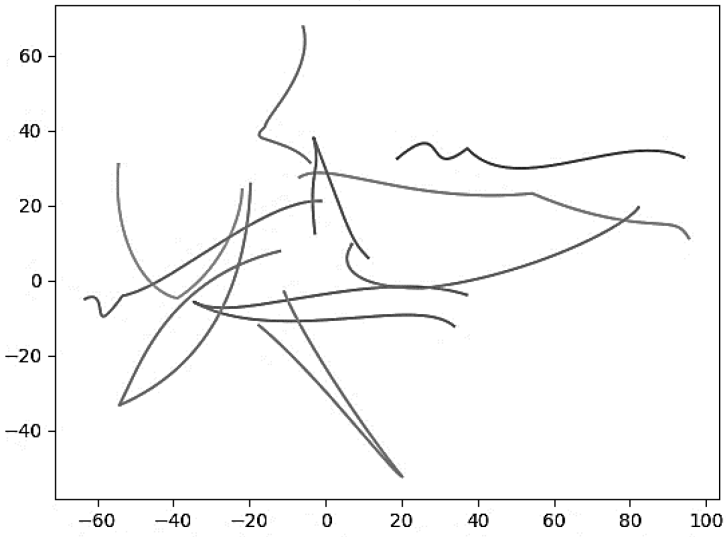


Рис. 3– Примеры контуров семейства *S2*

В таблице 1 приведены коэффициенты разложения кривых семейства *S2* по базису векторов *V*, построенному на основе генерации случайной выборки кривых семейства *S2* в количестве 200000. Приведена мощность шума – искажений за счет пикселизации, приходящаяся в среднем на один коэффициент разложения каждой кривой семейства. Размер пикселя принят равным 1. При таком размере пикселя максимальная погрешность приведения точки контура к сетке пикселей равна 0.5 по каждой из координат X или Y и равна $0.5\sqrt{2}$=0.707 при смещении точки по диагонали. Рассматривая при условии независимости расположения точек исходного семейства кривых от узлов пиксельной сетки погрешность как шум, назовем мощностью шума квадрат среднеквадратичного (стандартного) отклонения точки исходного контура от соответствующей точки пикселизированного контура. Мощность шума пикселизации на одну точку контура равна в среднем 0.166 на плоскости *XY*. Мощность шума в пространстве коэффициентов сингулярного разложения в среднем для всех контуров семейства равна 0.093.

Примечательно, что эта мощность одинакова и не зависит от номера коэффициента разложения при условии, что контура случайны и не синхронизированы с пиксельной сеткой. Для отдельных контуров мощность шума определения коэффициентов разложения отклоняется от средней, например, в случае, когда длинные горизонтальные или вертикальные прямые линии контура идут не по центрам пикселей и ошибка по длине прямой накапливается.

В табл.1 приведены полученные численно по формуле (1) мощности параметров разложения контуров семейства *S2* и шума пикселизации.

Таблица 1 – Мощности параметров разложения контуров семейства *S2* и шума пикселизации

Номер параметра	Средняя мощность параметра для одной кривой контура	Средняя мощность погрешности параметра δ_k
1	136529	0.0911
2	13281	0.0847
3	7947	0.0811
4	482.9	0.0826
5	27.24	0.0805
6	5.603	0.0810
7	0.1865	0.0813
8	0.000162	0.0819

В таблице 2 приведены средние значения для восстановленных контуров (в примере были восстановлены все контура семейства S2).

Таблица 2– Значения средних мощностей и среднего квадратичного отклонения (СКО)

Средняя мощность шума на точку контура кривой	0.166
Средняя мощность шума на один параметр кривой	0.083
Средняя погрешность пикселизации на одну точку контура	0.409
СКО точек на плоскости *XY* по всему семейству *S2* восставленного контура для адаптивного фильтра	0.091
СКО сглаженного контура при использовании фильтров Гаусса 1. 2. 3	0.661; 0.652; 0.720

На рис. 4 показаны исходный и восстановленный контур, результат после пикселизации и сглаживания разными фильтрами Гаусса [5]. Тонкие кривые 1, 2, 3 – контура, полученные после сглаживания пикселизированного контура фильтром Гаусса с разной полосой: 1 – сглаживание использует 3 соседних пикселя в полосе пропускания, 2 – 5 соседних, 3 – 11 соседних.

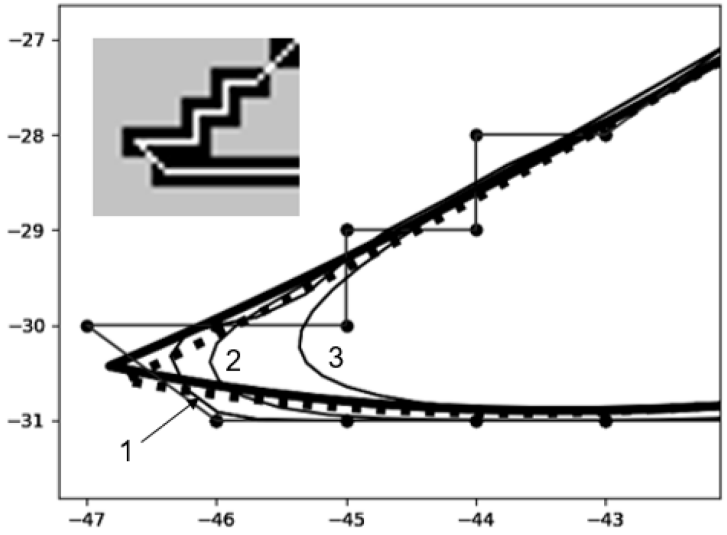


Рис. 4 – Исходная кривая – жирная линия; восстановленная кривая –жирный пунктир; контур после пикселизации - тонкая линия между точками (центрами пикселей)

В левом верхнем углу рис. 4 – фрагмент исходного растрового изображения (6х7 пикселей) с дополнительно проведенной белой линией между центрами пикселей.

Сглаживающий фильтр имеет погрешность на семействе кривых в 3 – 12 раз больше адаптивного фильтра, в зависимости от соотношения размера пикселя и радиуса кривизны кривой, наличия углов, способа выполнения предобработки контура и др.

Для определения количества компонент контура можно использовать разные критерии [6,7]. В задачах распознавания можно было бы в качестве критерия использовать отношение сигнал/шум. Шум обусловлен погрешность определения коэффициентов разложения, которая для каждого из коэффициентов практически постоянна в среднем по семейству, и искажениями, обусловленными отбрасыванием убывающих в среднем компонентов разложения с индексом больше m.

В задаче восстановления контура применение критерия максимизации сигнал/шум приведет к выделению главных компонент с наибольшей мощностью, подавлению мелких деталей контура и его сглаживанию.

Для восстановления формы контура лучше максимизировать ожидаемый процент восстановления контура, измеряемый из условия минимизации СКО восстановленного сигнала от исходного. Разобьем матрицу V на две подматрицы: V_n – для тех компонент, которые мы учитываем, и V_{-n} – для компонент, которые отбрасываем. Качество восстановления контура в евклидовой норме можно оценить так

$$Q(n) = \frac{\|KV\| - \|KV_{-n}\| - \sum_{k=1}^{n} \delta_k}{\|KV\|},$$

где $\|KV_n\|$ – мощность сохраняемых компонент контура, $\|KV_{-n}\|$ – мощность отбрасываемых компонент, δ_k – мощность шума для компонента k, которую можно считать постоянной величиной для семейства функций с нормированным уровнем и для похожих семейств. Величина критерия качества восстановления Q достигает 100%, если нет шума пикселизации и учитываются все компоненты разложения контура по базису V.

Функция $Q(n)$ при условии убывания мощности коэффициентов разложения семейства ниже уровня мощности шума имеет максимум при некотором $n<N$, этот максимум достигается при учете компонент, уровень которых для исходного семейства выше уровня шума. Компоненты с уровнем ниже уровня шума надо отбрасывать при настрое адаптивного фильтра в среднем на минимальную ошибку восстановления контуров семейства.

Заключение. Проблема восстановления контуров объектов, получаемых из растровых изображений и искаженных за счет пикселизации, пропуска пикселей, неточного выбора порога дискретизации, плохо решается за счет использования сглаживающих фильтров, особенно если контура содержат точки излома или области высокой кривизны.

Использование адаптивного линейного фильтра, полученного на основе сингулярного разложения обучающей выборки семейства кривых позволяет восстанавливать кривые семейства (контура) с погрешностью, которая в несколько (3 – 12) раз меньше, чем достигаемая при использовании широко распространенного фильтра Гаусса, даже если оптимально были выбраны параметры последнего.

Адаптивный фильтр за счет использования информации, содержащейся в свойствах семейства кривых, позволяет:

- восстановить исходную кривую семейства с погрешностью, в несколько раз меньшей погрешности дискретизации;
- сохранить острые углы для кривых, если они присутствовали в исходном семействе, что не позволяют делать сглаживающие фильтры;
- восстанавливать форму кривых семейства при пропуске части пикселей на плохом изображении;
- регулировать значимость тех или иных сегментов кривых за счет выбора весов при обучении фильтра;
- подстраивать фильтр как на минимальную среднюю ошибку при восстановлении функций семейства при их относительно равновероятном появлении, так и на уменьшение

погрешности восстановления отдельных кривых семейства.

Адаптивный фильтр может быть использован в системах компьютерного зрения, при распознавании изображений по контурам, особенно с использованием камер низкого разрешения, при решении задач увеличения масштаба изображения с сохранением качества контуров.

Список литературы

1. *Фурман Я.А., Кревецкий А.В., Передреев А.К.* Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов. Изд. 2. - Физматлит, 2003, 592 С.
2. *Fukunaga K., Olsen D.R.* An algorithm for finding intrinsic dimensionality of data. IEEE Trans. Comput. 1971, C-20, 176–183.
3. *Harrington P.* Machine Learning in Action. — Shelter Island, 2012. – С. 280. – ISBN 9781617290183.
4. *Jolliffe I.T.* Principal Component Analysis, Series: Springer Series in Statistics, 2nd ed., Springer, NY, 2002, XXIX, 487 p. 28 illus. ISBN 978-0-387-95442-4.
5. *Nixon M.S., Aguado A.S.* Feature Extraction and Image Processing. Academic Press, 2008, p. 88.
6. *Fukunaga K., Olsen D.R.* An algorithm for finding intrinsic dimensionality of data. IEEE Trans. Comput. 1971, C-20, 176–183.
7. *Dormann C.F., Elith J., Bacher S., Buchmann C., Carl G., Carré G., Marquéz J.R., Gruber B., Lafourcade B., Leitão P.J., Münkemüller T.* Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. Ecography 36(1), 27–46 (2013).

1.2.2.

А.Д. Плужников, Л.В. Когтева, Е.А. Маврычев,
Е.Н. Приблудова, С.Б. Сидоров, Е.Г. Чужайкин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
институт радиоэлектроники и информационных технологий,
кафедра информационных радиосистем,
Нижний Новгород, pluzhnikov@nntu.ru

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ АМПЛИТУДНЫХ ФЛЮКТУАЦИЙ ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ПЕРЕИЗЛУЧЕННЫХ ВОЗДУШНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Описана методика моделирования амплитудных флюктуаций для импульсных радиолокационных сигналов. В общем случае флюктуации полагаются коррелированными. Корреляционные свойства флюктуаций обеспечиваются моделированием цифровой рекурсивной фильтрации.

Ключевые слова: *радиолокационные сигналы, амплитудные флюктуации, обработка сигналов.*

Введение и общая формулировка задачи

Аналитическое описание радиотехнических и, в частности, радиолокационных систем зачастую оказывается затруднительным из-за сложности систем. В связи с этим их математическое моделирование оказывается эффективным средством анализа и проектирования. При таком анализе и проектировании средств обработки принимаемых радиолокационных сигналов прежде всего требуется решить задачу моделирования входного воздействия для указанных средств, т.е. задачу моделирования упомянутых сигналов. В ряде импульсных радиолокационных систем обработка принимаемых сигналов включает в себя так называемую межпериодную обработку: имеется в виду период зондирования – период повторения зондирующих (излучаемых локатором) радиоимпульсов. Межпериодная обработка выполняется, например, с целью накопления (когерентного или некогерентного) слабых принимаемых импульсов, а также с целью извлечения информации, содержащейся в параметрах (часто в амплитудах) принимаемых радиоимпульсов. В случае некогерентного накопления (накопления после амплитудного детектирования) или в случае извлечения информации, содержащейся в изменяющихся амплитудах принимаемых радиоимпульсов (как в некоторых радиолокационных пеленгаторах, входящих в состав импульсных радиолокаторов сопровождения воздушных объектов), моделирование должно учитывать характерные особенности изменения амплитуд принимаемых сигналов [1-4]. Принимаемые локатором полезные сигналы (последовательность радиоимпульсов) называем переизлученными сигналами. Они могут представлять собой сигналы, рассеянные элементами воздушного объекта (летательного аппарата), или сигналы, излученные установленным на объекте ответчиком (транспондером). При этом наиболее существенным фактором, определяющим качество обработки сигналов являются амплитудные флюктуации переизлученных сигналов – случайные изменения амплитуд принимаемых радиоимпульсов [2-5].

Определение методики моделирования амплитудных флюктуаций для переизлученных сигналов является задачей данной работы.

Конкретизация решаемой задачи

Моделирование сигналов с амплитудными флюктуациями должно обеспечивать формирование последовательности отсчетов, каждый из которых имеет некоторое случайное значение, равное амплитуде принимаемого импульса. Следовательно, один такт

моделирования будет соответствовать одному периоду зондирования. При этом формируемая последовательность отсчетов должна иметь заданные (требуемые) значения параметров: математического ожидания (МО) и среднеквадратичного отклонения (СКО), интервала корреляции отсчетов, значение которого взаимосвязано [5] с шириной спектра амплитудных флюктуаций, и некоторых других (см. ниже).

Предлагаемая методика моделирования

Если бы допустимым являлось моделирование принимаемых сигналов последовательностью независимых отсчетов (что соответствует неограниченно широкому спектру амплитудных флюктуаций), то можно было бы воспользоваться функциями формирования последовательности независимых чисел, содержащимися во многих средах (пакетах) программирования. В частности, широко распространенными являются функции формирования независимых чисел с нормальным (гауссовским) вероятностным распределением при заданных МО и СКО. Однако, как уже упоминалось, требуется формировать последовательность не независимых, а коррелированных отсчетов с заданными МО, СКО и интервалом корреляции, так как реальные амплитудные флюктуации радиолокационных сигналов имеют ограниченный спектр [2-4]. Функции формирования последовательностей соответствующих чисел при заданных значениях указанных параметров зачастую отсутствуют в широко распространенных средах программирования.

Предлагается при моделировании преобразовать последовательность нормально распределенных независимых чисел (сформированную соответствующей функцией какой-либо среды программирования) посредством программной реализации цифрового фильтра нижних частот. Наиболее простой реализацией такого фильтра является цифровой рекурсивный фильтр 1-го порядка (рис. 1).

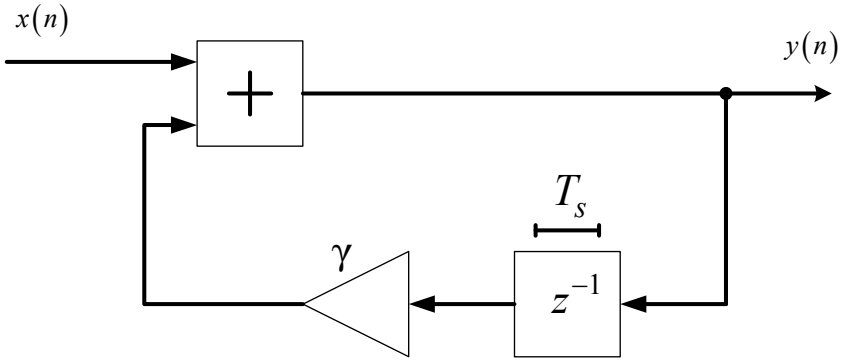


Рис. 1 – Цифровой рекурсивный фильтр 1-го порядка

Как показано на рис.1, фильтр содержит сумматор, элемент умножения на действительный коэффициент – коэффициент обратной связи

$$0 < \gamma < 1 \qquad (1)$$

и элемент z^{-1} задержки на такт моделирования, что соответствует задержке на период зондирования T_s (см. выше).

При условии (1) автокорреляционная функция формируемых фильтром отсчетов $y(n)$ является неотрицательной и монотонно убывающей, что соответствует условиям получения результатов в работе [5].

Последовательность отсчетов $x(n)$ на входе фильтра (рис. 1) при моделировании, как говорилось, должна представлять собой независимые числа с нормальным вероятностным распределением, сформированные соответствующей функцией, а $y(n)$ является результатом фильтрации, т.е. представляет собой последовательность коррелированных отсчетов (с ограниченным спектром). Это две функции номера n отсчета (номера такта моделирования).

Разумеется, предлагаемое моделирование реализуется при вполне определенных

допущениях (ограничениях) относительно вероятностного распределения (нормального) и формы энергетического спектра (корреляционной функции: формируемые отсчеты оказываются экспоненциально коррелированными) формируемых отсчетов $y(n)$. Однако подобные допущения необходимы для определенности и, корме того, не является далекими от реальности, позволяя получать требуемые количественные оценки при анализе и проектировании систем. Кроме того, сделанный выбор допущений обеспечивает аналитическое описание взаимосвязи параметров флюктуаций с параметрами модели.

Напомним, что значения отсчетов $y(n)$ являются амплитудами моделируемых импульсов, действующих на радиолокационное приемное устройство с периодом T_s и, следовательно, не должны быть отрицательными. Но при действии на фильтр (рис. 1) отсчетов $x(n)$ с нормальным вероятностным распределением отсчеты $y(n)$ тоже будут иметь нормальное распределение, т.е. могут принимать отрицательные значения, хотя и с крайне малой вероятностью, так как данные о реальных амплитудных флюктуациях [2] позволяют оценить соотношение их МО V_{0y} и СКО σ_y следующим образом:

$$4 \le V_{0y} / \sigma_y \le 30. \qquad (2)$$

Тем не менее, моделирование будет более корректным, если после программной реализации фильтра (рис. 1) осуществить "обнуление" отрицательных чисел.

Кроме того, при моделировании требуется игнорировать первые t_y из отсчетов $y(n)$, соответствующие переходному процессу в фильтре (рис. 1).

Заключение

Таким образом, предлагаемая методика позволяет выполнить математическое моделирование амплитудных флюктуаций для реальных радиолокационных сигналов. При этом структура фильтра (рис. 1) и замечания, сделанные относительно последовательности отсчетов $x(n)$ на входе фильтра,

– соответствуют условиям, для которых в [5] определена взаимосвязь между известной [2] шириной энергетического спектра и интервалом корреляции амплитудных флюктуаций;

– с использованием [6] позволяют (при известном интервале корреляции) найти значение единственного параметра фильтра (рис. 1) – γ, а после этого – t_y, а также связать с заданными значениями V_{0y} и σ_y параметры функции формирования последовательности $x(n)$ независимых нормальных случайных чисел – МО и СКО этих чисел, т.е. позволяют определить все параметры модели.

Кроме того, при определении параметров модели не следует забывать об ограничениях (1) и (2).

Список литературы

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справ. / Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, А.С. Маляренко и др.; под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с. URL: http://publ.lib.ru/ARCHIVES/SH/SHIRMAN_Yakov_Davidovich/ (дата обращения 06.06.2025)
2. Справочник по радиолокации. В 2-х книгах. Книга 1. / Под ред. М.И. Сколника. Пер. с англ. под ред. В.С. Вербы. М: Техносфера, 2015. 672 с. URL: https://www.technosphera.ru/lib/book/347 (дата обращения 25.05.2025)
3. *Бартон Д.* Радиолокационные системы / пер. с англ. М: Военное издательство, 1967. 480 с. URL: https://www.studmed.ru/barton-vard-radiolokacionnye-sistemy_eb91c7ddd01.html (дата обращения 29.05.2025)
4. *Дымова А.И., Альбац М.Е., Бонч-Бруевич А.М.* Радиотехнические системы / под ред. А.И. Дымовой. М.: Советское радио, 1975. 440 с.
5. *Плужников А.Д., Балашова Д.М., Когтева Л.В., Приблудова Е.Н., Сидоров С.Б., Чужайкин Е.Г.* Определение корреляционных свойств для сигналов с флюктуирующими параметрами в задачах моделирования радиолокационных систем // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 9. – С. 19-22.
6. *Сергиенко А.Б.* Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.

1.2.2.

Д.Е. Решетников, А.Н. Кожевников, К.А. Матвеев, Н.В. Пустовой

Новосибирский государственный технический университет
факультет летательных аппаратов,
кафедра прочности летательных аппаратов,
Новосибирск, denis.reshetnikov.99@bk.ru, kozhevnikov.2010@corp.nstu.ru,
matveev@corp.nstu.ru, sr-nso@adm.nstu.ru

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ТРОСОВ

Представлены этапы разработки автоматизированного подхода к обработке экспериментально определенных частот собственных колебаний. Указанный подход основан на применении расчетной модели струны как схематизации упругого троса с относительно большим уровнем тяжения. Предложенный алгоритм может быть реализован на любом языке программирования.

Ключевые слова: *упругий трос, спектр частот собственных колебаний, модель струны, анализатор частот «ЛЭПТОН-1», алгоритмизация.*

В различных пространственных конструкциях для обеспечений их жесткости и устойчивости при минимизации массы применяют различные растяжки и оттяжки, например, в конструкциях воздушных линий электропередачи (далее ВЛ) для обеспечения устойчивости и жесткости опор ВЛ часто используются натянутые упругие элементы в конструкциях. На этапе проектирования достаточно строго просчитываются как режимы работы здания или сооружения, так и определяются уровни растягивающих нагрузок в каждом подобном упругом элементе. При этом для обеспечения заявленного уровня надежности конструкции необходимо осуществлять контроль фактического продольного усилия, созданного в элементе при его монтаже.

В практике эксплуатации упругих оттяжек зачастую не удается определить уровень продольных напряжений или тяжение элемента при использовании существующих методов неразрушающего контроля. В связи с этим актуальной является задача идентификации растягивающего усилия в упругом элементе на основе другого принципа – контроля частот собственных колебаний [1].

Теоретической основой метода является расчетная модель поперечных колебаний прямолинейной растянутой струны. Известное аналитическое решение можно найти, например, в [2]. Частота собственных колебаний связана с растягивающим усилием формулой вида:

$$\omega_n = \frac{\pi n}{L}\sqrt{\frac{T}{\rho}},$$

где n — номер формы колебаний; T — растягивающее усилие, Н; L — длина струны, м; ρ — погонная плотность, кг/м.

Анализатор частот конструкций башенного типа «ЛЭПТОН-1» внесен в Госреестр СИ РФ (запись 84220-21) предназначен для измерения перемещений конструкций во времени с последующим анализом записанного сигнала на основании Быстрого Преобразования Фурье (БПФ) [3].

Измерительный комплекс предоставляет в результате своей работы до десяти значений частот собственных колебаний объекта исследования в порядке убывания амплитуды каждой из зафиксированных гармоник. Определение номера формы колебаний только лишь по спектру частот не представляется возможным.

Дополнительно в полученном спектре могут присутствовать не только частоты упругого троса, но и окружающих элементов, остальных элементов общей конструкции и т.д [4, 5]. Поэтому крайне важно выделить именно те частоты, которые относятся к объекту исследования.

В силу особенности аналитической модели, все ее частоты являются кратными к низшей. На основании этого разработан алгоритм идентификации фактического растягивающего усилия в тросе, реализованный в среде Mathcad. Основные шаги выполнения разработанного алгоритма представлены ниже в порядке следования.

1. На первом этапе происходит отбор частот собственных колебаний для анализа в виде набора значений частот колебаний системы f_i $(i=1..10)$.
2. Выбранные частоты сортируются к форме спектра колебаний – в порядке возрастания $f_1 \le f_2 \le ... \le f_{10}$. На основании расчетной модели фактические частоты являются кратными (с целочисленными множителями) и имеют существенные интервалы между модами колебаний, поэтому применение сортировки является оправданным.
3. Относительная погрешность экспериментальной частоты f_i измерительного комплекса составляет не более одного процента во всем диапазоне, однако несовершенство реальной конструкции, нелинейные эффекты и неизвестность внешнего воздействия приводят к необходимости использования более широкого допуска при работе алгоритма. Фактический уровень допуска Δ необходимо определять на этапе тестирования программного продукта.
4. Для каждой частоты в отсортированном спектре вводится допуск Δ по пункту 3 алгоритма (f_i-Δ; f_i+Δ). Затем полученные оценки масштабируются с учетом кратности и сопоставляются с остальными значениями частот собственных колебаний. Положительные результаты сопоставления для частоты f_j фиксируются в дополнительный массив $rez_{i,j}$.
5. При проходе по всем элементам спектра оценивается, какая из частот имеет максимальную потенциальную кратность – наибольшее число записей в соответствующей *j-ой* строке массива *rez*. Именно эта частота f_j и идентифицируется как результат работы алгоритма.

Выполним тестирование алгоритма на двух измерениях собственных колебаний одного троса. Полученные экспериментальные данные приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные данные для тестирования алгоритма

Измерение 1				Измерение 2			
Датчик 1		Датчик 2		Датчик 1		Датчик 2	
f_i, Гц	Ампл.	f_i, Гц	Ампл.	f_i, Гц	Ампл.	f_i, Гц	Ампл.
3,31	1,00	6,63	1,00	7,33	0,99	1,41	1,00
4,52	0,68	20,18	0,48	6,43	1,00	15,66	0,39
10,04	0,54	3,31	0,36	14,86	0,57	6,22	0,50
18,47	0,37	26,40	0,10	25,90	0,15	22,29	0,19
22,29	0,32	23,29	0,14	4,32	0,65	30,42	0,11
15,36	0,37	18,07	0,16	21,78	0,20	27,81	0,14
13,05	0,39	4,42	0,25	28,31	0,08	24,50	0,17
23,99	0,27	15,46	0,14	20,18	0,21	25,60	0,16
20,08	0,33	14,66	0,14	18,57	0,24	13,75	0,20

Результаты работы алгоритма с допуском пять процентов показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты тестирования алгоритма

Измерение 1				Измерение 2			
Датчик 1		Датчик 2		Датчик 1		Датчик 2	
f_i, Гц	кратность		f_i, Гц	f_i, Гц	кратность		f_i, Гц
3,31	**9**	**5**	**3,31**	4,32	3	4	1,41
4,52	4	3	4,42	**6,43**	**5**	**4**	**6,22**
6,63	2	3	6,63	7,33	4	2	9,54
10,04	2	0	14,66	14,86	2	2	13,75
13,05	0	0	15,46	18,57	0	2	15,66
15,36	0	0	18,07	20,18	0	0	22,29
18,47	0	0	20,18	21,79	0	0	24,50
20,08	0	0	23,29	25,90	0	0	25,60
22,29	0	0	26,40	28,31	0	0	27,81
23,99	0	–	–	–	–	0	30,42

В таблице нулями обозначено отсутствие кратных результатов в силу пределов измерения комплекса (не более 30 Гц). Показано, что частота 3,31 Гц имеет наибольшее число кратных частот по обоим датчикам, однако не проявилась во втором измерении. Этот результат соответствует проведенному ранее исследованию, показавшему, что в эксперименте зачастую фиксируется именно вторая частота, а не низшая форма собственных колебаний. Частоты 6,43 и 6,22 Гц из второго измерения могут рассматриваться как кратные к 3,31 Гц при использовании более широкого допуска.

Результаты тестирования подтверждают работоспособность сформулированного алгоритма и показывают необходимость продолжения исследований в данном направлении. Алгоритм идентификации частот собственных колебаний упругих элементов оформлен в виде самостоятельного программного приложения для удобства конечного потребителя.

Список литературы

1. *Minullin R.G., Akhmetova I.G., Kasimov V.A., and Piunov A.A.* Location monitoring with determining the location of damage and the current performance of overhead power lines Translated from Élektricheskie Stantsii, No. 11, November 2022, pp. 30 – 38 DOI 10.1007/s10749-023-01635-4.

2. *Бабаков И.М.* Теория колебаний – 3-е изд., стереотипное, Москва 1968. – 560 с.

3. *Оппенгейм А.В., Шафер Р.В.* Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. – М. : Связь, 1979. – 416 с.

4. *Хейлен, Ламменс, Сас*. Модальный анализ. – М: «Новатест», 2010. -319 с.

5. *Постнов В.А., Шлотманн Г.* Использование экспериментальных данных об изменении динамически свойств упругих систем в задачах опредения структурных повреждений // Вестн. Нижегор. Ун-та. Сер.Механика. - 2004. - №1. - С. 32-42.

1.2.2.

[1]А.А. Решетов, [2]Г.А. Гулий

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ),
кафедра «Сопротивление материалов»,
andrew331@bk.ru, galinagoolii@gmail.com

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ СЛУЧАЙНОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С НЕСТАЦИОНАРНЫМ СПЕКТРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ

В работе представлена методика моделирования сейсмического воздействия, как нестационарного случайного процесса. Сейсмическое ускорение задаётся как произведение огибающей, описывающей временную эволюцию уровня воздействия, и квазистационарного случайного процесса, имеющего переменный во времени спектральный состав. Генерирование квазистационарного случайного процесса основано на взвешенном преобразовании Фурье. В работе показано, что учёт нестационарности спектра сейсмического воздействия может существенно изменять динамический отклик систем. В заключительной части выполнен расчёт на надежность здания методом статистических испытаний: была сформирована составная функция работоспособности, синтезирован набор акселерограмм и произведено 50 испытаний, что позволило оценить вероятность отказа здания. Предложенные методики обеспечивают более точную и реалистичную оценку сейсмической безопасности современных зданий и сооружений.

Ключевые слова: *сейсмическое воздействие, нестационарный спектр, генерирование акселерограммы, оценка надёжности, метод статистических испытаний.*

Представление случайного сейсмического воздействия, как нестационарного случайного процесса

В.В. Болотиным [1] было предложено представлять случайное сейсмическое воздействие в виде произведения огибающей $A(t)$ и стационарного случайного процесса $y(t)$:

$$a(t) = A(t) \cdot y(t). \quad (1)$$

Огибающая в таких моделях обычно задается с помощью аппроксимирующей функции, параметры которой подбираются либо теоретически, либо на основании статистического анализа записей реальных сейсмических событий.

Ф.Ф. Аптикаевым [2] в качестве огибающей была предложена следующая эмпирическая формула:

$$A(t) = A_0 \cdot \frac{3td}{9t^2 - 9td + 4d^2}, \quad (2)$$

где A_0 – характеризует максимальные ускорения;

d – ширина импульса.

На рис.1 изображен график этой функции.

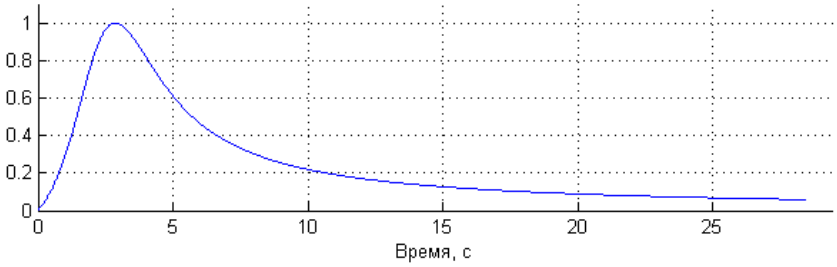


Рис. 1 - Форма огибающей

Основной характеристикой стационарного случайного процесса y(t) является спектральная плотность мощности (или автокорреляционная функция, связанная с ней соотношением Винера-Хинчина [3]). Примером спектральной плотности мощности является функция изображенная на рис.2.

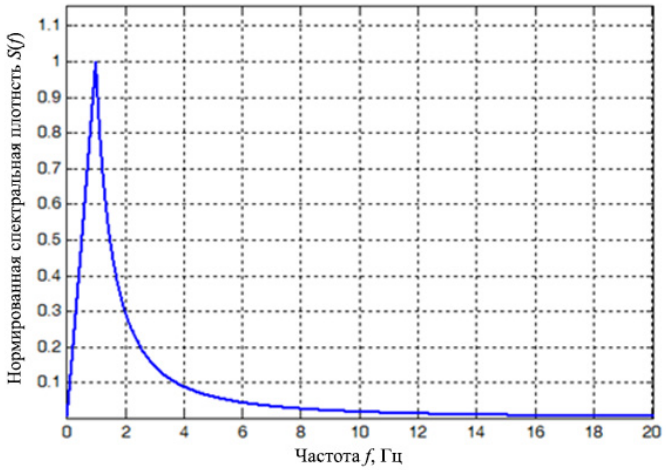


Рис. 2 - Спектральная плотность мощности

Нестационарность процесса (1) определяется наличием непостоянной огибающей, которая приводит к переменной во времени амплитуде и, следовательно, переменной дисперсии. Однако процесс $y(t)$ является стационарным в широком смысле (постоянная дисперсия и математическое ожидание). Спектральный состав такого сигнала является постоянным во времени, т.е. стационарным.

Теперь обобщим формулу (1) таким образом, что процесс $y(t)$ будем считать квазистационарным, т.е. такой процесс будет иметь уже переменный во времени спектральный состав, но постоянную во времени усредненную по частоте мощность. Пример квазистационарного процесса изображен на рис.4.

Моделирование случайного сейсмического воздействия с применением взвешенного преобразования Фурье

При использовании данного метода мы будем представлять акселерограмму в форме произведения огибающей на квазистационарный случайный процесс. При этом мы задаемся целевыми характеристиками сейсмического воздействия такими, как огибающая и частотно-временная спектрограмма (спектральная плотность мощности, зависящая от времени). Целевые характеристики могут быть получены в результате обработки ряда инструментальных акселерограмм, т.е. записей, полученных на сейсмостанциях.

Рассмотрим алгоритм моделирования случайного сейсмического воздействия с применением взвешенного преобразования Фурье:

1. Задаемся исходными данными:

- Спектральная плотность мощности $S_a(f,t)$. Исходная спектральная плотность мощности была получена посредством обработки инструментальных акселерограмм;
- Огибающая $A(t)$. Огибающая задавалась по формуле (2);
- Случайные фазы $\varphi_{n,k} \sim U(0, 2\pi)$.

2. Дискретизация временной и частотной областей:

- Разбиение временной сетки:

$$t_k = k \cdot \Delta t, \qquad k = 0,1,\dots,N-1. \tag{3}$$

- Разбиение частотной сетки:

$$f_n = \frac{n}{T}, \qquad n = 0,1,\dots,M-1. \tag{4}$$

3. Формирование комплексных спектральных амплитуд:

$$X(f_n, t_k) = \sqrt{2S_a(f_n, t_k)\Delta f}\, exp(i\varphi_{n,k}), \tag{5}$$

где $\Delta f = \frac{1}{T}$.

4. Взвешенное преобразование Фурье:

Квазистационарный стационарный сигнал синтезируется по следующей формуле:

$$y(t_k) = \sum_{n=0}^{M-1} W(f_n, t_k) X(f_n, t_k) e^{i2\pi f_n t_k}, \quad (6)$$

где $W(f_n, t_k)$ — оконная функция, контролирующая локальность спектра, например, гауссово окно:

$$W(f_n, t_k) = e^{-\frac{(t_k - t_0)^2}{2\sigma^2(f_n)}}. \quad (7)$$

5. Получаем акселерограмму умножением огибающей на квазистационарный сигнал:

$$a(t_k) = A(t_k) \cdot y(t_k). \quad (8)$$

Реализация синтезированной по данной методике акселерограммы приведена на рис.3.

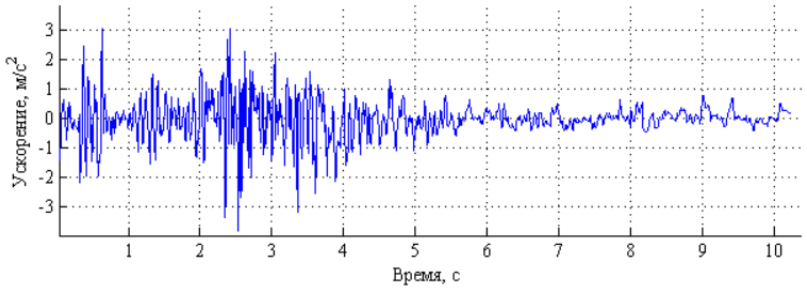


Рис. 3 - Синтезированная акселерограмма

На рис.4 показана квазистационарная часть акселерограммы и ее частотно-временная спектрограмма.

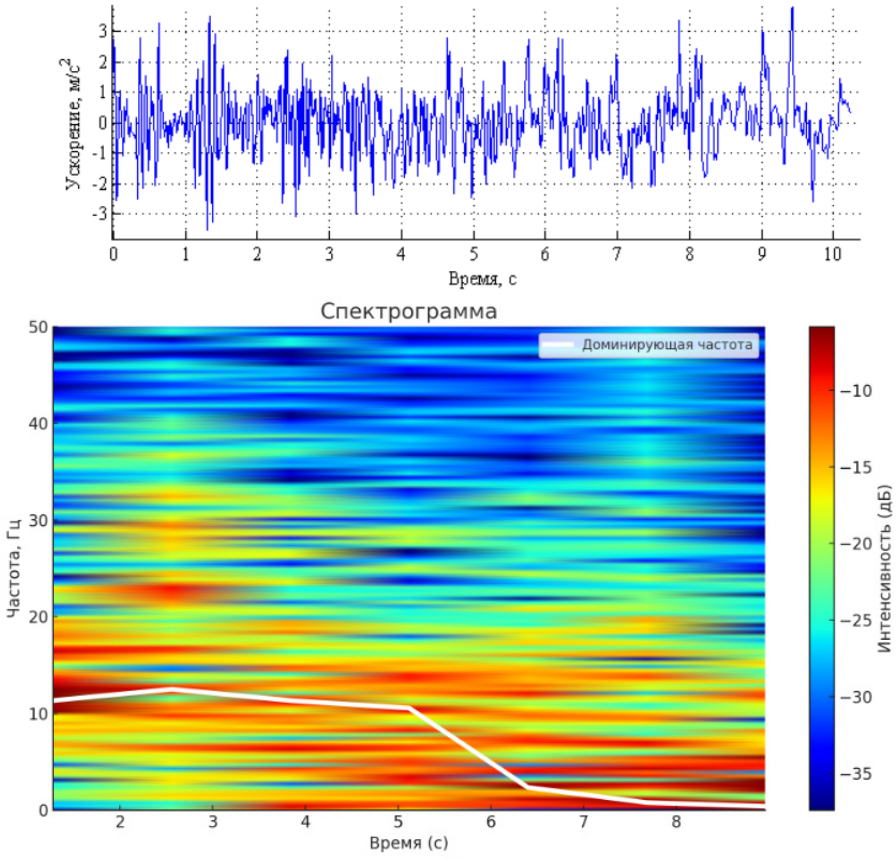


Рис. 4 - Синтезированный квазистационарный случайный процесс

Сгенерированная акселерограмма имеет переменный во времени спектральный состав - доминантная частота и ширина спектра уменьшается со временем. Такая акселерограмма довольно хорошо описывает реальную (инструментальную) сейсмическую запись.

Сравнение реакций линейных осцилляторов на акселерограммы с постоянным и переменным во времени спектральным составом при одинаковых полных амплитудных спектрах Фурье.

Произведем сравнительный анализ реакции линейных осцилляторов на действие двух акселерограмм (рис.5,7) с одинаковыми полными амплитудными спектрами Фурье.

На рис.5 представлена акселерограмма с переменным во времени спектральным составом и ее полный амплитудный спектр, на рис.6 представлена квазистационарная часть акселерограммы и ее частотно-временная спектрограмма.

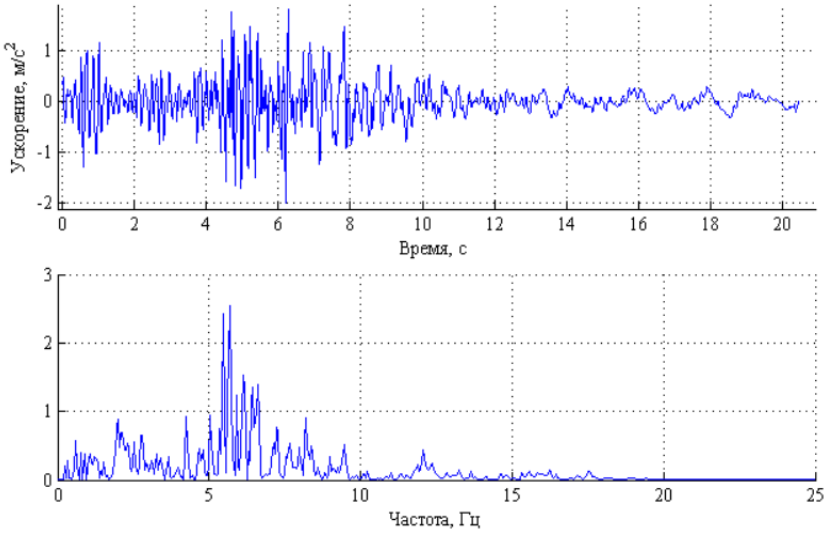


Рис. 5 - Акселерограмма с переменным во времени спектральным составом и ее амплитудный спектр Фурье

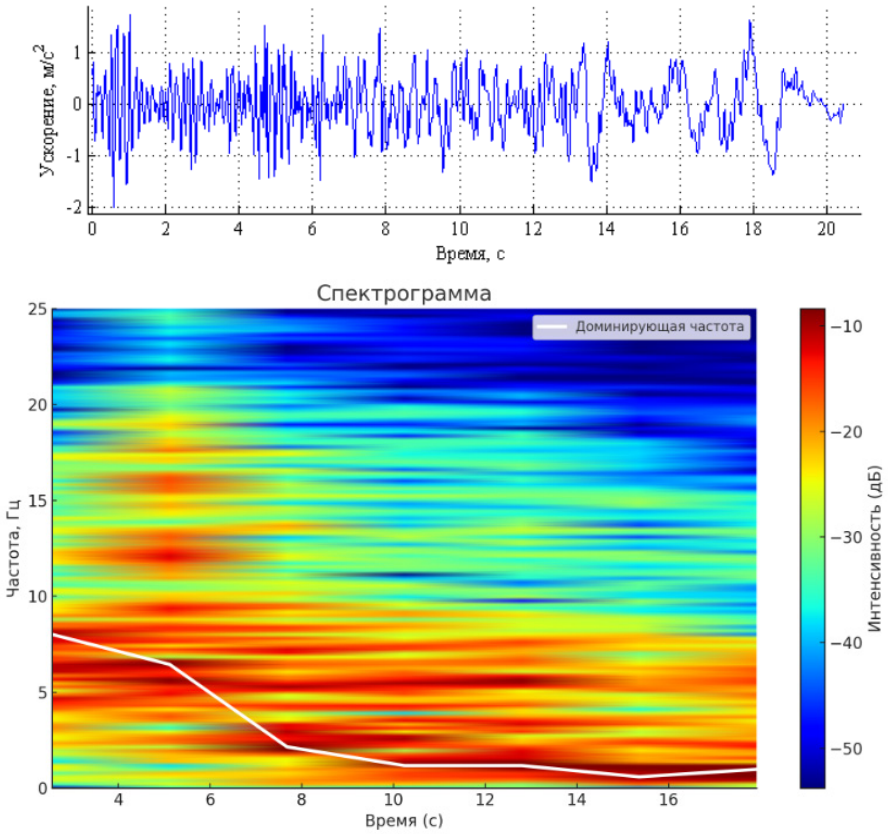


Рис. 6 - Квазистационарная часть акселерограммы и ее частотно-временная спектрограмма

На рис.7 представлена акселерограмма с постоянным во времени спектральным составом и ее полный амплитудный спектр, на рис.8 представлена стационарная часть акселерограммы и ее частотно-временная спектрограмма.

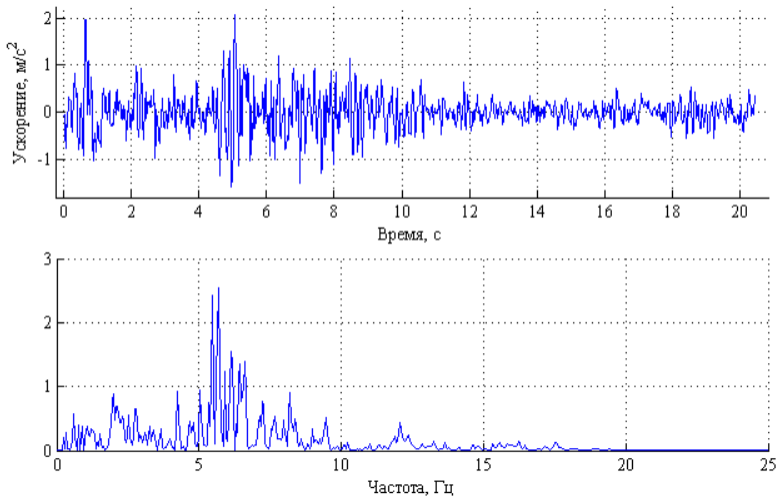


Рис. 7 - Акселерограмма с переменным во времени спектральным составом и ее амплитудный спектр Фурье

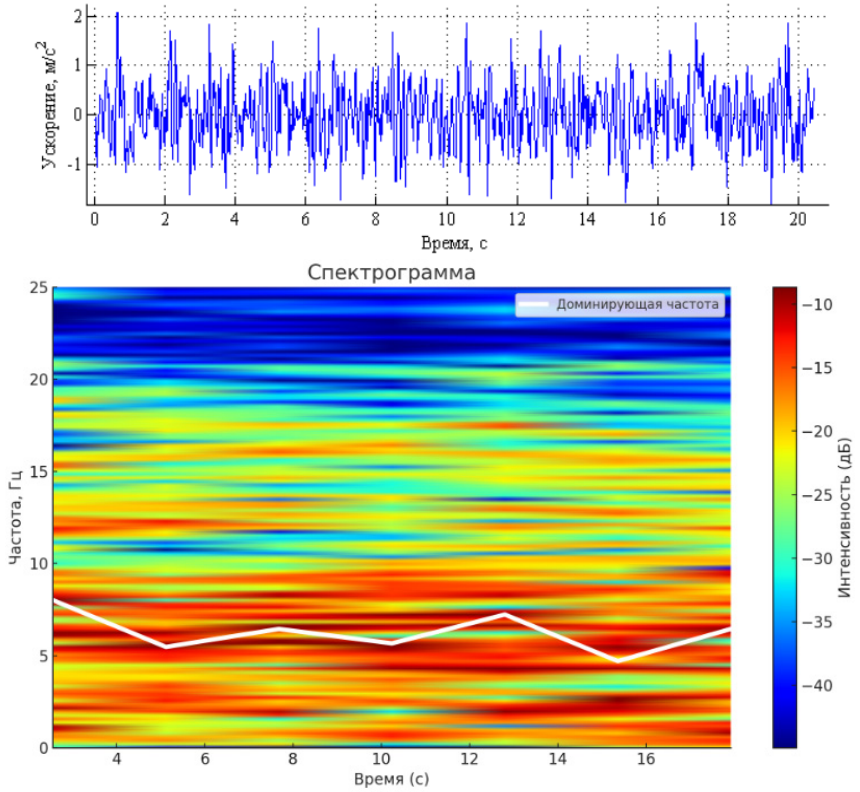


Рис. 8 - Стационарная часть акселерограммы и ее частотно-временная спектрограмма

Линейный осциллятор описывается следующим уравнением:

$$\ddot{x}(t) + 2\eta\dot{x}(t) + \omega_0^2 x(t) = -a(t), \quad (9)$$

где: η – параметр затухания (задан как 5% от критического), ω – циклическая частота осциллятора, $a(t)$ – акселерограмма землетрясения.

Проводится серия расчетов для диапазона собственных частот в интервале (0; 15] Гц. В каждом расчете записывается максимум абсолютного значения ускорения осциллятора и для всего диапазона частот строится так называемы спектр ответа (рис.9).

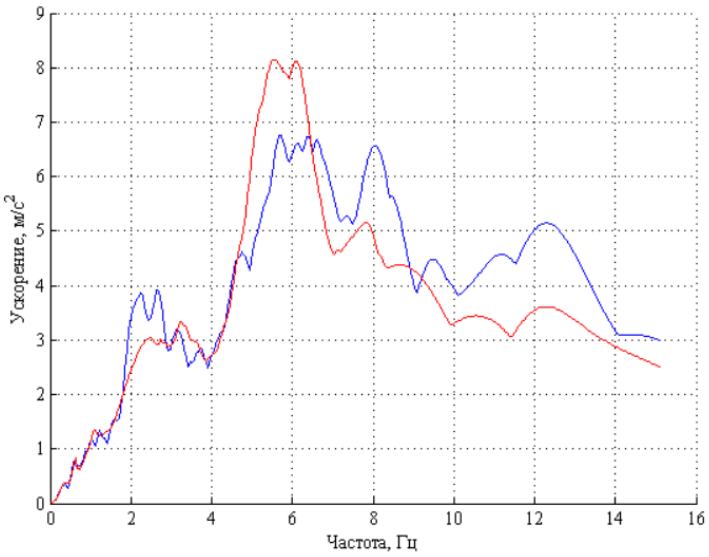


Рис. 9 - Спектры ответа (синим – первая акселерограмма, красным – вторая)

Анализируя результат, мы видим, что для осцилляторов из диапазона собственных частот от примерно 1,9 Гц до 3 Гц и от 6,2 Гц и далее реакция (ускорение) будет большей при действии акселерограммы с переменным во времени составом, а в диапазоне от 4,3 Гц до 6,2 Гц реакция будет большей от воздействия акселерограммы с постоянным во времени спектральным составом.

Таким образом несмотря на одинаковые полные амплитудные спектры Фурье акселерограмм, реакция систем на акселерограммы с постоянным и переменным во времени спектральным составом отличается. Это связано с различием временного распределения энергии, приближением доминантной частоты к собственным частотам осцилляторов в определенные моменты времени. Исходя из полученных результатов, видим необходимость учета временной структуры спектра при моделировании сейсмических воздействий.

Расчет на надежность здания оригинальной архитектурной формы при действии случайного сейсмического воздействия

В основе архитектурного облика рассматриваемого здания — параллельно сложенные друг на друга прямоугольные объёмы, смещённые относительно центральной части в разные стороны. Архитектурная конструкция включает в себя 7 этажей над уровнем земли и один подземный этаж, выполняющий функцию подземной парковки. Перекрытия в здании сталежелезобетонные. Балки перекрытия выполнены из сварных двутавров сечением 400х1200 мм, шаг балок 1800 мм.

Расчетная схема здания представляет собой пространственную конечно–элементную модель с применением стержневых и пластинчатых конечных элементов (рис.10).

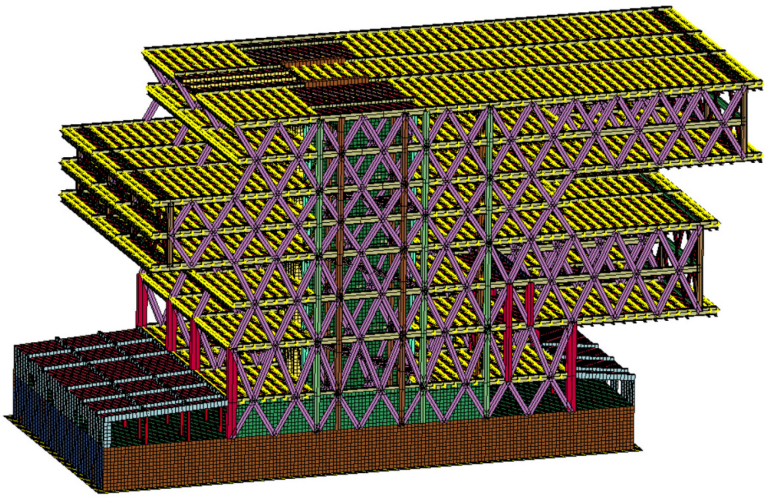


Рис. 10 - Конечно-элементная модель исследуемого здания в изометрическом виде

Расчёт рассматриваемого здания на надёжность проводился методом статистических испытаний. В качестве случайного варьируемого фактора использовалась трехкомпонентная акселерограмма, заданная в виде сил инерции.

В качестве функции работоспособности принимаем составную функцию (10), состоящую из 2-х ветвей: 1) Оценивает максимальный межэтажный сдвиг (11); 2) Оценивает максимальное вертикальное перемещение конца наиболее длинной консоли (12).

$$g(X) = min\{g_{drift}(X), g_{vert}(X)\}. \quad (10)$$

$$g_{drift}(X) = \delta_{lim} - max_{i,t}|\Delta_i(t)|. \quad (11)$$

$$g_{vert}(X) = \delta_{v,lim} - max_t|\delta_v(t)|. \quad (12)$$

Область отказа описывается условием $g(X) < 0$.

При этом принимаем: предельный межэтажный сдвиг $\delta_{lim} = 0.03$ м, предельное вертикальное перемещение консоли $\delta_{v,lim} = 0.5$ м.

Было проведено 50 испытаний в каждом из которых синтезировалась случайная акселерограмма землетрясений, проводился детерминированный расчет и записывалось значение функции работоспособности.

Целевая интенсивность сейсмического воздействия составляла 8 баллов, что соответствует что максимальному ускорению 2 м/$с^2$.

Было сгенерировано 1000 акселерограмм, построена гистограмма максимумов (11). В качестве внешнего воздействия использовались 50 акселерограмм из данного сгенерированного набора. Целевая доминантная частота акселерограмм равнялась 2 Гц. Теоретическим законом распределения для распределения максимумов является распределение Гумбеля с наиболее вероятным значением, равным 2 м/$с^2$.

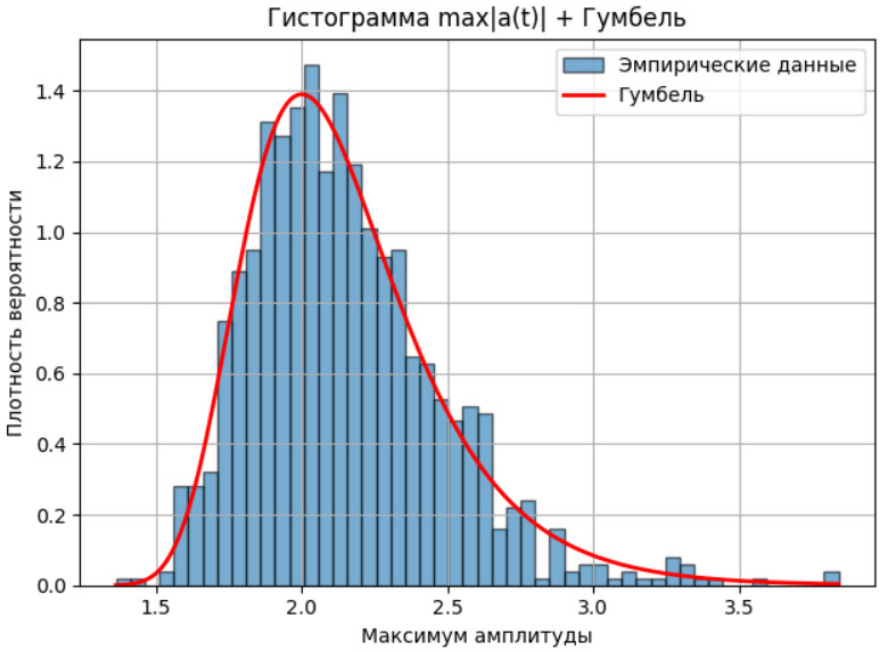


Рис. 11 - Закон распределения максимумов акселерограмм

В результате расчета были получены значения функции работоспособности.

На рис.12 изображена масштабированная (x5) деформированная схема здания в момент времени 8 с.

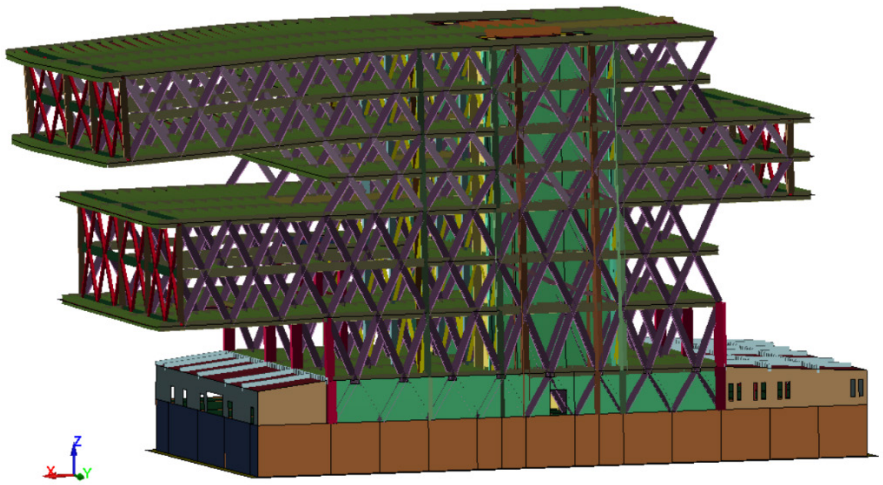


Рис. 12 - Масштабированная деформированная схема здания

На рис.13 представлена гистограмма и теоретический закон распределения составной функции работоспособности $g(X)$.

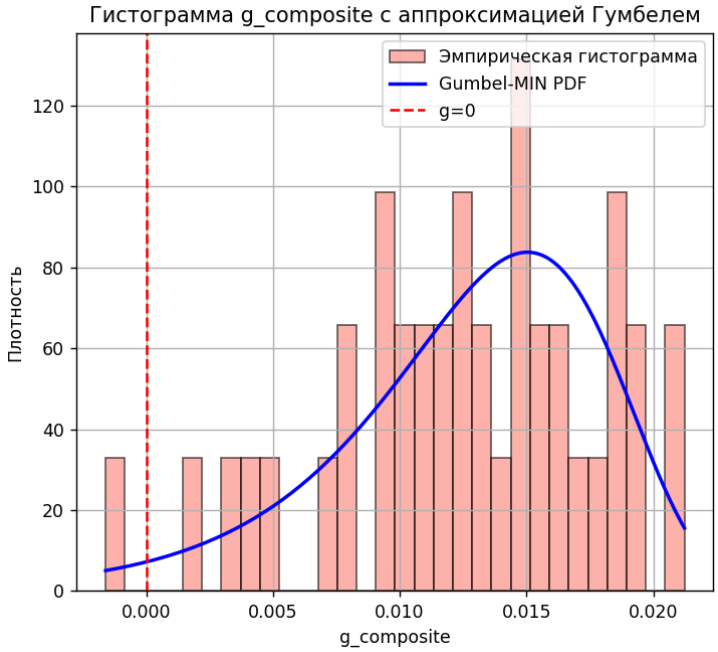


Рис.13 - Гистограмма и теоретический закон распределения функции работоспособности $g(X)$

В качестве теоретического закона распределения для составной функции работоспособности, представляющей собой минимум из двух случайных величин, с достаточной точностью подходит экстремальное распределение Гумбеля для минимума (Gumbel-MIN).

Аппроксимировав эмпирический закон распределения теоретическим, находим, что оценка вероятности отказа равна 0,032 (площадь под кривой теоретического закона распределения Гумбеля при $g(X) < 0$).

Основные результаты и выводы

1. Разработана методика моделирования случайного сейсмического воздействия с переменным спектральным составом с применением аппарата взвешенного преобразования Фурье;
2. Проведен сравнительный анализ реакций линейных осцилляторов на действия акселерограмм со стационарным и нестационарным спектральным составом;
3. Предложена методика оценки надежности и получена оценка надежности здания оригинальной архитектурной формы при действии случайного сейсмического воздействия.

В целях повышения надежности и экономичности проектирования зданий и сооружений в условиях динамических нагрузок целесообразно в ряде случаев использовать вероятностные методы расчёта, учитывающие случайную природу как нагрузок, так и параметров конструкций. Такой подход позволяет более объективно оценивать риски отказа и варьировать уровень безопасности в зависимости от требований к сооружению.

При моделировании сейсмических воздействий, следует учитывать нестационарность спектрального состав этих воздействий. Даже при совпадении интегральных спектральных характеристик временное распределение энергии может существенно влиять на отклик системы. Поэтому для более точного анализа динамического поведения конструкций рекомендуется использовать модели, отражающие частотно-временную структуру воздействий.

Список литературы:

1. *Болотин В.В.* Методы теории вероятностей и теории надёжности в расчётах сооружений. – М.: Стройиздат. 1982. – 351 с.
2. *Аптикаев Ф.Ф.* Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. – М.: ООО «Наука и образование». 2012. – 176 с.
3. *Светлицкий В.А.* Статистическая механика и теория надёжности. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2004. – 504 с.
4. *Мкртычев О.В., Решетов А.А.* Сейсмические нагрузки при расчёте зданий и сооружений: монография. – М.: Изд-во АСВ. 2017. – 140 с.
5. *Бакалов В.П.* Цифровое моделирование случайных процессов. – М.: МАИ. 2001. – 81 с.
6. *Мкртычев О.В., Райзер В.Д.* Теория надёжности в проектировании строительных конструкций: монография. – М.: Изд-во АСВ. 2016. – 908 с.
7. *Mkrtychev O.V., Reshetov A.A.* Modeling Worst-case Earthquake Accelerograms for Buildings and Structures // Advances in Engineering Research. 2016. Vol. 72. P. 89–94.
8. *Mkrtychev O.V., Reshetov A.A.* Synthesis of worst-case accelerograms for a linear system with a finite number of degrees of freedom // International Journal of Computer and Communication System Engineering. 2015. Vol. 11, No. 3. P. 101–115.
9. *Нюмарк Н., Розенблюэт Э.* Основы сейсмостойкого строительства. – М.: Стройиздат. 1980. – 344 с.
10. *Zhao Y.-G., Zou C.-X., Zhang X.-Y., Weng Y.-Y.* A Critical Review on Methods for Time-Dependent Structural Reliability // Structure and Infrastructure Engineering. 2023. Vol. 19, No. 7. P. 1001–1023.

1.2.2.

[1]Е.И. Романенко, [1,2]И.А. Банщикова, [1]Н.В. Пустовой, [1]Ю.С. Селиванов

[1]Новосибирский государственный технический университет,
факультет летательных аппаратов, кафедра прочности летательных аппаратов,
[2]ФГБУН Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
Новосибирск, yevgeny.romanenko@yandex.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РЕАКЦИИ ОПОР В ANSYS

Предложен алгоритм автоматического определения разрушающей нагрузки конструкций в среде ANSYS. Метод основан на анализе реакции опор при приложении управляемого перемещения с адаптивным шагом. Разработанный APDL-макрос реализует критерий остановки расчета при достижении максимума реакции. Валидация на образцах в виде проушин из алюминиевого сплава Д16Т показала расхождение с экспериментами 1-7%. Алгоритм сокращает время оценки несущей способности и устраняет субъективизм ручного анализа.

Ключевые слова: *разрушающая нагрузка, виртуальный эксперимент, метод конечных элементов, нелинейный анализ, ANSYS APDL.*

Введение

Современная авиационная индустрия сталкивается с постоянно растущими требованиями к надёжности и лёгкости конструкций при одновременном сокращении сроков и затрат на их разработку и сертификацию. Традиционные натурные испытания на прочность до разрушения занимают значительные ресурсы: подготовка макетов, изготовление дорогостоящих прототипов и проведение серии статических и усталостных испытаний могут занимать месяцы и обходиться очень трудоемко [1, 2].

В этом контексте виртуальное тестирование — моделирование физических испытаний с помощью методов конечно-элементного анализа (МКЭ) [3] — становится ключевым инструментом. Оно позволяет прогнозировать механическое поведение конструкции на этапах проектирования, сокращая количество «реальных» испытаний и снижая затраты времени и средств [4]. Для определения разрушающих нагрузок в нелинейной постановке в современных CAE-пакетах используются встроенные методы [5], которые позволяют отслеживать полную кривую "нагрузка-перемещение", включая посткритическое поведение. Несмотря на свою мощь, эти методы требуют глубокого понимания нелинейной механики, тщательного выбора параметров решения и могут страдать от проблем сходимости.

Автоматизация вычисления разрушающей нагрузки в инженерной практике затруднена, так как требует многократного запуска расчётов с различными шагами и критериями. Часто в конечно-элементных пакетах реализуются алгоритмы расчета разрушающей нагрузки, основанные на адаптивном пошаговом режиме приращения нагрузки. Неверный выбор параметров для определения приращения шага нагружения может привести к тому, что разрушающая нагрузка P_{max} , окажется заниженной или завышенной.

Таким образом, актуальной задачей является создание автоматизированного алгоритма, который на этапе виртуального тестирования сам определял бы оптимальный шаг нагружения, отслеживал изменение реакции закреплений и однозначно фиксировал момент достижения предельной нагрузки. Именно решение этой задачи и является целью данной работы: разработать и реализовать в среде ANSYS APDL макрос, полностью автоматизирующий процедуру поиска P_{max} по критерию максимума реакции, без ручных корректировок и дополнительного программирования за пределами CAE-среды.

Алгоритм

Имеется конструкция, аппроксимированная конечно-элементной моделью. Под воздействием контролируемого перемещения узлов в закреплениях возникает реакция. Алгоритм рассматривается как экстремальный поиск функции:

$$R(u) = \left(R_x(u), R_y(u), R_z(u)\right), \quad (1)$$

где $R_j(u)$ – суммарная реакция закрепленных узлов i по осям x, y, z при заданном перемещении u вычисляемая по формуле:

$$R_j(u) = \sum_i R_j(u),\ j \in \{x, y, z\}. \quad (2)$$

Тогда скалярная величина суммарной реакции определяется как:

$$R(u) = \sqrt{R_x(u)^2 + R_y(u)^2 + R_z(u)^2}. \quad (3)$$

Цель алгоритма – найти такое u^*, при котором $R(u)$ достигает максимума, то есть:

$$u^* = max\left(R(u)\right). \quad (4)$$

Тогда разрушающая нагрузка определяется как:

$$P_{max} = R\left(u^*\right). \quad (5)$$

Для практического вычисления u^* используется итерационный метод с контрольным шагом Δu_k, который меняется в зависимости от поведения реакции.

Обозначим:

u_k – текущее перемещение на итерации k,

$R_k = R(u_k)$ – реакция при u_k,

$\Delta R_k = \frac{R_k - R_{k-1}}{R_k} \times 100\%$ – относительное изменение реакции.

Принят следующий критерий остановки:

$$\Delta R_k < \varepsilon,\ \varepsilon < 0 \quad (6)$$

В работе принято $\varepsilon = -1\%$, тогда алгоритм фиксирует u_{k-1} как u^*.

Адаптивный шаг Δu_k задан так:

$$\Delta u_k = \begin{cases} \Delta u_{min}, \Delta R_k < 2 \\ \Delta u_{mid}, 2 \le \Delta R_k \le 5, \\ \Delta u_{max}, \Delta R_k > 5 \end{cases} \quad (7)$$

где $\Delta u_{min}, \Delta u_{mid}$ и Δu_{max} подбираются индивидуально для каждой задачи.

Предложенный алгоритм сочетает в себе простоту реализации в ANSYS APDL и достаточную адаптивность. Он ориентирован на поиск максимума суммарной реакции закреплений, принимаемой за предельную нагрузку. На рисунке 1 представлена блок-схема алгоритма.

Рис. 1 – Блок-схема алгоритма

Валидация алгоритма

В качестве первичной проверки работоспособности разработанного алгоритма и APDL-макроса было проведено несколько виртуальных испытаний. Изготовлены 4 типа образцов в виде проушины с разной геометрией из алюминиевого сплава Д16Т. На рисунке 2 изображены натурные образцы. Проведены натурные испытания, зафиксирована разрушающая нагрузка P_{EXP}. Проведен виртуальный эксперимент, определены численные предельные нагрузки $P_{max} = P_{FEM}$. В таблице приведены вычисленные и полученные из испытаний разрушающие нагрузки, а также представлена их относительная разница.

Рис. 2 – Испытанные образцы

Таблица – Сравнение предельных нагрузок

Тип образца	P_{EXP}, Н	P_{FEM}, Н	Относительная разница, %
1	17385	17064	1.8
2	17682	17064	3.5
3	19731	19025	3.6
4	21506	20006	7.0

Алгоритм показал быструю сходимость и автоматическое завершение расчёта при наступлении предельного состояния, без вмешательства пользователя. Относительная разница нагрузок оказалась не более 7%. Ключевым преимуществом алгоритма является универсальность, он позволяет рассчитывать конструкции любой геометрической сложности, а также составные конструкции, выполненные из различных материалов.

Список литературы

1. *Богомолов, М. В.* Виртуальные испытания изделий / Труды МАИ. – 2010. – № 38. – С. 11.
2. *Чернов А.В., Козелков А.С., Шагалиев Р.М., Стрелец Д.Ю.*. Действующая система требований в области проведения виртуальных испытаний образцов создаваемых изделий авиационной техники – Качество и жизнь. – 2020. – № 4(28). – С. 61-71.
3. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов. - М.: Мир, 1975 – 258 с.
4. *Ostergaard M.G., Ibbotson A.R., Roux O.L., and Prior A.M.* (2011). VirtualTesting of Aircraft Structures. CEAS Aeronaut. J. 1, 83–103.
5. Ansys Help [Электронный ресурс]: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v251/en/ans_thry/thy_tool10.html

1.2.2.

Ю.С. Селиванов, К.А. Матвеев, Е.И. Романенко

Новосибирский государственный технический университет,
факультет летательных аппаратов, кафедра прочности летательных аппаратов,
Новосибирск, u.s.selivanov@mail.ru

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Существует достаточно много методов и подходов к топологической оптимизации в области механики деформируемого твердого тела, ставшие уже классическими. В настоящее время активной развивается возможность применения нейронных сетей в разных областях, в том числе и в задачах механики. В работе представлен алгоритм применения нейронных сетей к задаче топологической оптимизации как бессеточный подход.

Ключевые слова: *метод конечных элементов, топологическая оптимизация, нейронные сети.*

Введение

Топологическая оптимизация – это процесс при проектировании изделий, заключающийся во внесении изменений в конструкцию или деталь с созданием новых границ объема тела и удалением существующих, с целью ее оптимизации по критериям минимизации массы, максимальной жесткости и спектру собственных частот, при сохранении предоставляемых к нему прочностных требований [1]. Первыми серьезными работами считаются работы «Topology Design of Structures» [2], опубликованная в 1993 году, «Optimization of structural topology, shape, and material» [3], опубликованная в 1995 году и «Topology optimization: theory, methods and applications» [4], второе издание которой опубликовано в 2003 году. Данные работы достаточно похожи и описывают базовые подходы к оптимизации конструкций, рассматривая проблему с точки зрения оптимального распределения материала.

Алгоритм

Любой алгоритм решения задачи топологической оптимизации можно описать следующим образом:

– получение вектора проектных переменных (на первом этапе их задание);

– вычисление механических характеристик материала, решение конечно-элементной задачи и вычисление целевой функции;

– использование метода оптимизации для получения вектора проектных переменных для следующего шага.

Весь алгоритм повторяется до тех пор, пока не будет выполнено какое-либо ранее заданное условие или ограничение.

Основная суть подхода к задаче топологической оптимизации как к задаче оптимального распределения материала заключается в использовании так называемой псевдоплотности [4], которая характеризует наличие материала в той или иной точке и как правило варьируется от 0 до 1 либо дискретно, либо непрерывно в зависимости от метода оптимизации. Постановка задачи топологической оптимизации, как задачи на условный экстремум, использовавшаяся в данной работе

$$\left.\begin{aligned} &\min C = F^T \cdot U \\ &G_0(\rho) = \frac{\sum_i v_i \rho_i}{\mathrm{V}_0} - f \le 0 \\ &0 \le \rho_i \le 1, i = 1,...,N \end{aligned}\right\}. \quad (1)$$

Здесь F – вектор узловых нагрузок, U – вектор узловых перемещений, v и V_0 – объем конечного элемента и общий объем соответственно, ρ – вектор псевдоплотностей.

Применение нейронной сети позволяет репараметризировать вектор проектных переменных или псевдоплотностей параметрами сети. Таким образом появляется возможность использовать методы обучения нейронных сетей в задаче топологической оптимизации.

Задачей нейронной сети в общем случае является установление некоторой нелинейной связи между входными данными и выходными, в данной работе входными данными будут являться геометрические координаты центров тяжести конечных-элементов, а выходными данными будут являться «сырые» значения проектных переменных, то есть такие, которые необходимо подвергнуть последующей обработке в виде фильтрации или проекции. Таким образом можно прийти к соотношению (2) в двухмерном случае.

$$x = f(X, Y, w, b). \quad (2)$$

Здесь x – вектор переменных проектирования, X и Y – соответствующие векторы координат центров конечных элементов, w и b – веса и смещения нейронной сети. В данной работе исследовалась нейронная сеть, построенная по принципу перцептрона, имеющая различное количество слоев и нейронов в слое, но количество нейронов в каждом слое равно. Эта сеть является однонаправленной, то есть слои соединены один за другим в прямом порядке, не имеют обратных связей. В качестве функций активации во внутренних или скрытых слоях использовался линейный выпрямитель или LeakyReLU (3), функцией активации для выходного слоя являлась сигмоида (4). Такой набор функций выбран для того, чтобы гарантировать прохождение положительных величин во внутренних слоях нейронной сети и выходной величины в диапазоне от 0 до 1.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (3)$$

$$f(x) = \begin{cases} x, x \ge 0 \\ a \cdot x, x < 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Общий алгоритм решения задачи представлен на рисунке 1.

Рис. 1 – Алгоритм решения задачи топологической оптимизации с приминением нейронных сетей

Алгоритм решения задачи следующий - область аппроксимируется конечными элементами, далее получаются центра каждого конечного элемента. Эти величины являются входами для нейронной сети. Выходом нейронной сети является значение плотности в каждом конечном элементе. Далее применяется функция интерполяции материала, решается конечно-элементная задача. После вычисляется целевая функция, а далее все градиенты. Для использования нейронных сетей необходимо постановку задачи (1) преобразовать в непрерывную целевую функцию. Сделать это можно с помощью метода штрафов [5]

$$L(w,\alpha) = F^T U + \alpha \left(\frac{\sum_i v_i \rho_i(w)}{V_0} - f \right)^2. \quad (5)$$

Здесь w – параметры нейронной сети, $\rho(w)$ – вектор псевдоплотностей, полученный с помощью нейронной сети, α – штрафной параметр. С помощью метода оценки адаптивных моментов (Adam) [6] происходит обновление весов нейронной сети на основе вычисленных градиентов от целевой функции (5). Критерием остановки алгоритма является невязка. Для реализации нейронных сетей использовалась библиотека PyTorch.

Результаты

Решалась задача изгиба плоской пластины, находящейся в плосконапряженном состоянии, защемленной слева и нагруженной точечной силой в правом нижнем узле со значением 10 Н. В качестве метода интерполяции использовался SIMP [7]. Характеристики материала $E_{\min} = 0,001$ МПа, $E_{\min} = 1$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

В качестве ограничений выступал максимальный результирующий объем, который был задан в 70%, 80% и 90% от исходного. Задача решалась для разной степени дискретизации – общее количество конечных элементов было 800, 1250, 2278 и 5000. На рисунке 2 представлены результаты для количества конечных элементов равного 5000 и для ограничения объема в 70% полученных с помощью алгоритма и Ansys Workbench.

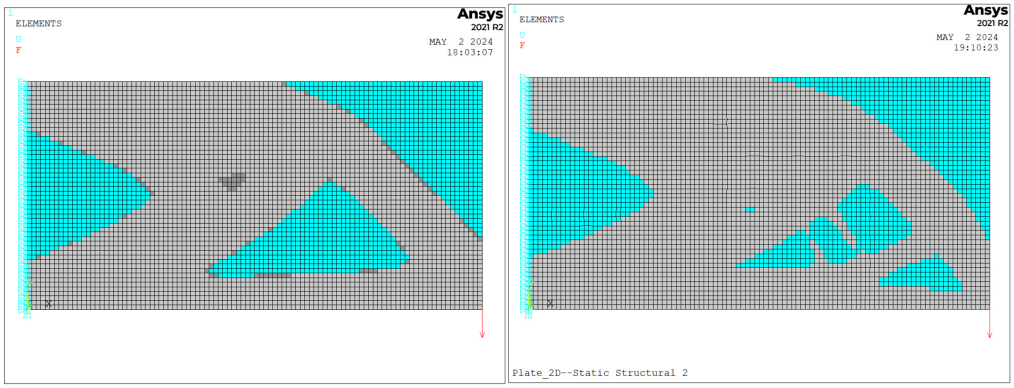


Рис. 2 – Результат для дискретизации в 5000 КЭ, полученные с помощью алгоритма (слева) и Ansys (справа)

Результаты выполненной оптимизации с помощью алгоритма, применяющего нейронные сети и результаты, получение в Ansys Workbench для аналогичных исходных данных представлены в таблице 1, относительная разница в таблице 2.

Таблица 1 – Результаты оптимизации

Ограничение объема	Значение целевой функции, Н·м							
	Алгоритм с НН				Ansys Workbench			
	800	1250	2278	5000	800	1250	2278	5000
0,9	4,582	4,641	4,718	4,782	7,203	7,120	7,084	7,007
0,8	4,959	4,989	5,089	5,099	7,703	7,595	7,514	7,407
0,7	5,437	5,402	5,499	5,545	8,411	8,243	8,067	7,993

Таблица 2 – Сравнение результатов оптимизации

Ограничение объема	Относительная разница, %			
	800	1250	2278	5000
0,9	58,38	53,42	50,15	46,53
0,8	55,33	52,23	47,65	45,26
0,7	54,69	52,59	46,69	44,15

Список литературы

1. ГОСТ Р 57911-2017 Термины и определения. –М.: Стандартинформ., 2018. – 4 с.
2. *Bendsøe M.P., Soares C.A.M.* Topology Design of Structures. Dordrecht: Springer Science-Business Media, 1993. 569 p.
3. *Bendsøe M.P.,* Optimization of structural topology, shape, and material. Springer,1995.
4. *Bendsøe M.P., Sigmund O.* Topology optimization: theory, methods and applications. Berlin: Springer, 2003. 370 p.
5. *Nocedal, J., and Wright, S.,* Numerical Optimization, 2nd ed., Springer, New York, NY, 2006
6. *Diederik P. Kingma and Jimmy Ba. Adam*: A method for stochastic optimization. In ICLR, 2015.
7. *Bendsoe M.P.; Sigmund O.* Material interpolation schemes in topology optimization. Arch. Appl. Mech. 1999,69, 635–654

1.2.2.

Р.З. Хайруллин

Московский государственный строительный университет,
кафедра Фундаментального образования,
Главный научный метрологический центр Минобороны России,
Мытищи, zrkzrk@list.ru

К ПОСТРОЕНИЮ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО ПАРАМЕТРА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА РАННИХ ЭТАПАХ РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ

Предложена технология применения вариационного принципа максимума энтропии на ранних этапах разработки и испытаний многокомпонентных технических систем с целью построения функции распределения определяющего параметра. Представлены результаты ее применения.

Ключевые слова: *вариационный принцип, определяющий параметр, функция плотности распределения, многокомпонентная техническая система.*

На начальных этапах реализации инновационных проектов по разработке сложных технических систем (ТС) [1-3], а также при формировании облика перспективных и не имеющих аналогов ТС имеет место сильный дефицит статистической информации. Применение стандартных методов вероятностного анализа для принятия обоснованных управленческих решений не представляется возможным. В описанной ситуации получение какой-либо обоснованной информации возможно, в том числе, при введении дополнительных допущений и предположений на характер изменения определяющего параметра (ОП) ТС. Однако при этом вносится субъективизм, отражающий точку зрения исследователя или разработчика, и принимаемые решения, и не могут считаться объективными.

При разработке и испытаниях многокомпонентных ТС (МТС) с метрологическим обеспечением основными ОП являются диапазоны и погрешности измерений. Целью статьи является разработка технологии, позволяющей формировать функцию распределения $F(x)$ ОП для МТС с целью получения объективных и обоснованных выводов на ранних этапах разработки и испытаний МТС на основе применения принципа максимума энтропии [1].

Принцип максимума энтропии был предложен Эдвином Джейнсом в середине прошлого столетия. С тех пор вышло большое количество работ, посвященных расчету функций распределения по известным ограничениям. Однако случай, когда в виде ограничений используются диапазоны измерений и погрешности измерений ОП МТС, в этих работах не исследовался. Отметим, что отдельные вопросы исследуемой в статье проблемы для однокомпонентных ТС рассматривались в [4].

Постановка задачи. Пусть имеется некоторая совокупность ограничений на диапазоны изменения ОП и на статистические моменты отдельных компонентов МТС. Ставится задача: не используя ничего, кроме этих ограничений, построить функцию распределения вероятностей, которая будет принята за модель изменения ОП МТС на данном (начальном или текущем) этапе разработки и испытаний МТС.

Пусть X - случайная величина с плотностью распределения $f(x)$. В соответствии с принципом максимума неопределенности [1] энтропия:

$$H = -\int_0^{\infty} f(x)\ln f(x)dx \qquad (1)$$

должна принимать максимальное значение и одновременно должны выполняться ограничения на искомую функцию $f(x)$.

Необходимое условие экстремума 1. Пусть плотность распределения $f(x)$ удовлетворяет условию:

$$f(x) > 0,\ x \in (x_l, x_m),\quad f(x) = 0,\ x \notin (x_l, x_m). \tag{2}$$

Функция распределения $F(x)$ МТС связана с функциями распределения ОП компонентов $F_i(x)$, $i = 1,2,...,n$ соотношением:

$$F(x) = \prod_{i=1}^{n} F_i(x). \tag{3}$$

Пусть также известны для каждой i - той компоненты статистические моменты до k - го порядка включительно:

$$m_{ik} = \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} x^k f_i(x)dx. \tag{4}$$

Тогда максимум энтропии достигается на распределении, составленном из кусочно-непрерывных функций $f(x)$, удовлетворяющих следующим дифференциальным уравнениям [1,4]:

$$(F'')^s(x)F^{s-1} - (F')^s \prod_{i=1}^{i-s} \sum_k \nu_{ik}^s k x^{k-1} = 0, \tag{5}$$

на участках (x_{s-1}, x_s), $s = 1,2,...,S$ если существуют такие константы ν_{ik}^s (неопределенные множители Лагранжа), что законы распределения:

$$F_i(x) = \sqrt[s]{F(x)}\,\frac{\sqrt[s]{\prod_{i=1}^{S} \sum_k \nu_{ik}^s k x^{k-1}}}{\sum_k \nu_{ik}^s k x^{k-1}} \tag{6}$$

удовлетворяют условиям (4) и условиям Эрдмана-Вейерштрасса (условиям сопряжения) [1,4]:

$$\left(f(x)\right)_- = \left(f(x)\right)_+,\ \left(\sum_k \nu_{ik}^s x_i^k\right)_- = \left(\sum_k \nu_{ik}^{s+1} x_i^k\right)_+, \tag{7}$$

на границах участков (x_{s-1}, x_s).

Необходимое условие экстремума 2. Пусть в дополнение к (1)-(4) законы распределения некоторых компонентов случайной величины X: $F_j(x)$, $(j = 1,2,...,q)$ уже известны и могут быть представлены в явном виде.

Тогда максимум энтропии достигается на распределении, составленном из кусочно-непрерывных функций $f(x)$, удовлетворяющих следующим дифференциальным уравнениям на отрезке (x_{s-1}, x_s) [1,4]:

$$(F'')^s F^{s-1}(x) - (F')^s \frac{\prod_{i=1}^{S} \sum_k \nu_{ik}^s k x^{k-1}}{\prod_{j=1}^{q} F_j(x)} = 0, \tag{8}$$

если существуют такие ν_{ik}^s, что законы распределения $F_i(x)$:

$$F_i(x) = \sqrt[s]{F(x)}\,\frac{\sqrt[s]{\prod_{i=1}^{S} \sum_k \nu_{ik}^s k x^{k-1}}}{\prod_{j=1}^{q} F_j(x) \sum_k \nu_{ik}^s k x^{k-1}} \tag{9}$$

удовлетворяют условиям (4) и (7).

Здесь $s = 1,2,...S$, S - параметр, зависящий от количества компонентов ТС (количество участков непрерывности функции плотности распределения $f(x)$). Разрывы могут возникать из-за того, что разные компоненты МТС имеют разные области определения и диапазоны изменений.

Результаты. Приведем результаты построения функции распределения $F(x)$ с применением уравнения (5) для ОП МТС при заданном значении статистического момента 1-го порядка ($k = 1$) и разных значениях s.

Уравнение (5) имеет тривиального решения $F(x) = const$. Некоторые случаи нетривиального решения приведены ниже:

1. $s = 1$, $F'' = F'a$, $a = \nu_3$, $F = \frac{c_1}{\nu_3} e^{\nu_3 x} + c_2$.

2. $s = 2$, $F(F'')^2 = (F')^2 a$, $a = \nu_1\nu_2$, $\frac{\sqrt{F}}{\sqrt{\nu_1\nu_2}} - \frac{1}{2\nu_1\nu_2} \ln\left|\sqrt{F} - \frac{c_3}{2\sqrt{\nu_1\nu_2}}\right| = x + c_4$.

3. $s = 3$, $F^2(F'')^3 = (F')^3 a$, $a = \nu_1\nu_2\nu_3$, $\frac{9a^2F^{2/3} - 6ac_1F^{1/3} + 2c_1^2 \ln\left|3aF^{1/3} + c_1\right|}{18a^3} = x + c_4$.

4. $s = 4$, $F^3(F'')^4 = (F')^4 a$,

$$a = \nu_1\nu_2\nu_3\nu_4 \quad \frac{4aF^{1/4}\left(16a^2F^{1/2} - 6ac_1F^{1/4} + 3c_1^2\right) - 3c_1^3 \ln\left|4aF^{1/4} + c_1\right|}{192a^4} = x + c_4.$$

5. $s = 10$, $F^9(F'')^{10} = (F')^{10} a$, $a = \prod_{i=1}^{10} \nu_i$,

$$\frac{1}{63000000000a^{10}} \cdot \left(10aF^{1/10}\left(700000000a^8F^{4/5} - 78750000a^7c_1F^{7/10} + 9000000a^6c_1^2F^{3/5} - \right.\right.$$
$$- 1050000a^5c_1^3F^{1/2} + 126000a^4c_1^4F^{2/5} - 15750a^3c_1^5F^{3/10} + 2100a^2c_1^6F^{1/5} - 315ac_1^7F^{1/10} + 63c_1^8\Big) -$$
$$\left. - 63c_1^9 \ln\left|10aF^{1/10} + c_1\right|\right) = x + c_{10}.$$

Отметим, что во всех случаях, кроме 1, решения представлены в общем виде (выразить искомую функцию $F(x)$ в классе аналитических функций в явном виде не представляется возможным). В случае 2 возможно получить явное выражение для $F(x)$ с помощью специальной математической функции Ламберта [5], которая над полем действительных чисел определяется из уравнения: $W(x)e^{W(x)} = x$.

Опишем результаты применения уравнения (8), когда функция распределения ОП одного компонента МТС имеет равномерное на отрезке $[a,b]$ распределение, а для другого компонента известно лишь математическое ожидание m, а сам закон распределения неизвестен.

Закон распределения представим в виде: $F(x) = \frac{x-a}{b-a} F_1(x)$. Тогда дифференциальное уравнение (8) примет вид: $F''(x) - F'(x)\frac{\nu(b-a)}{x-a} = 0$, где ν – неопределенный множитель Лагранжа.

Уравнение (8) имеет нетривиальное решение:

$$f(x) = F'(x) = c(x-a)^{\nu(b-a)}, \qquad F(x) = \frac{c(x-a)^{\nu(b-a)+1}}{\nu(b-a)+1},$$

где $c = \dfrac{m}{(1+ab-a^2)(b-a)^{m(1+ab-a^2)}}$, $v = \dfrac{m(1+ab-a^2)-1}{b-a}$.

Таким образом, закон распределения получен в явном виде.

На рис. 1 представлены функции плотности распределения $f(x)$ для разных значений $m = 0{,}8-4$ при $a = 0$, $b = 5$.

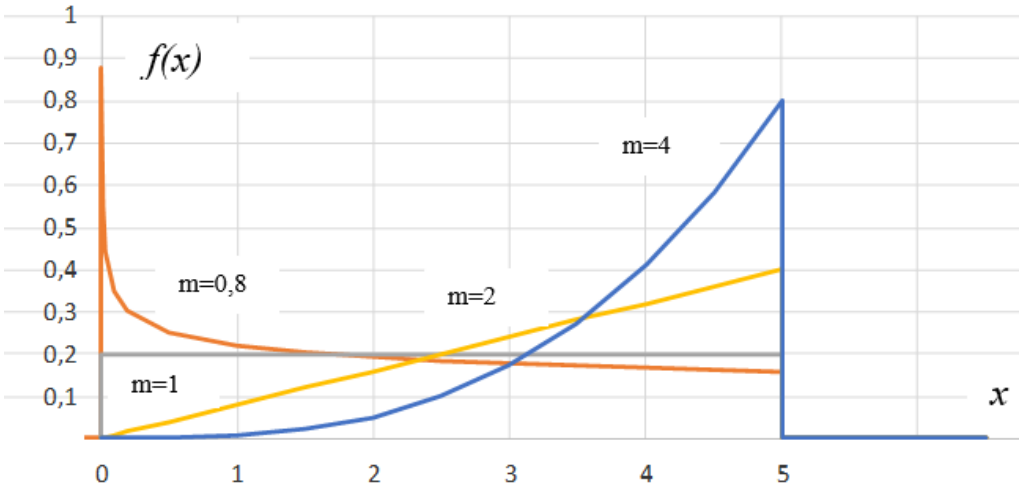


Рис. 1 – Функции плотности распределения $f(x)$ для разных значений m.

Видно, что при $x = 0$ с уменьшением m значение функции плотности распределения неограниченно возрастает, а при $m = 1$ имеет место равномерное распределение на отрезке $[0;5]$.

Таким образом, вид функции плотности распределения существенно зависит от среднего значения ОП m одного компонента МТС.

Заключение. Представленная технология позволяет на ранних этапах разработки и испытаний МТС получать объективные статистические оценки, не искаженные субъективными дополнительными предположениями и допущениями.

Разработанная в статье технология является более общей, чем описанная в [4]. С применением разработанной технологии, в частном случае, могут быть получены законы распределения ОП для однокомпонентных ТС.

Применение разработанной технологии на последовательных этапах разработки и испытаний МСТС позволяет производить поэтапное уточнение вида закона распределения ОП МТС. Результаты уточнения могут служить основой для внесения корректив как в содержание этапов разработки, так и в программы испытаний МТС.

Список литературы

1. *Мартыщенко Л.А., Панов В.В.* Методы военно-научных исследований в задачах разработки и испытания вооружения. Москва: Министерство обороны СССР. 1981. 280 с.

2. *Костоглотов А.А., Лазаренко С.В., Пугачев И.В.* Синтез систем фазовой автоподстройки частоты в условиях возмущений на основе модели объединенного принципа максимума и дискретного метода инвариантного погружения. Инженерный вестник Дона. 2020. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6710/.

3. *Ташевский А.Г.* Математические модели продолжительности жизненного цикла технических систем. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. № 1 (190). С. 169–178.

4. *Хайруллин Р.З.* Применение вариационного принципа в задачах разработки и испытаний сложных технических систем // Инженерный вестник Дона. 2025. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2025/9845.

5. *Дубинов А. Е., Дубинова И. Д., Сайков С. К.* W-функция Ламберта и ее применение в математических задачах физики. Саров. Изд-во ФГУП. РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2006. 160 с.

1.2.2.

Е.Г. Царькова, Ю.В. Чемарина

Тверской государственный университет, математический факультет,
Тверь, university69@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РЕЦИДИВНОЙ ПРЕСТУПНОСТИ

В работе приводится формализация задачи управления ресурсами при реализации мероприятий по снижению повторной (рецидивной) преступности среди лиц, ранее отбывавших наказания за совершенные правонарушения. Рассматриваемый процесс сведен к решению задачи оптимального управления. Получены соотношения, описывающие динамику состояний системы, построены частные численные решения.

Ключевые слова: *уголовно-исполнительная система Российской Федерации, рецидивная преступность, криминогенная остановка, оптимальное управление, система массового обслуживания.*

В настоящее время в условиях роста криминогенных угроз возрастает потребность в выработке эффективных мер борьбы с преступностью, в том числе, с использованием методов прогнозирования [1]. В работе [2] показано, что при решении рассматриваемого класса задач, включающих прогнозирование уровня рецидивной (повторной) преступности в регионах России, может быть применено компьютерное моделирование.

Введем в рассмотрение граф состояний системы, приведенный на рис. 1 [2, 3].

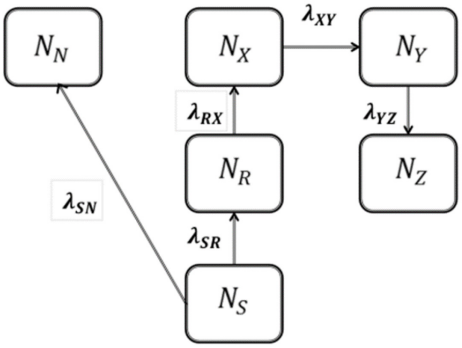


Рис. 1. – Граф состояний системы

Для данного графа состояний введены следующие обозначения: N_N – число осужденных, отбывших наказание и обладающих устойчивым убеждением не совершать повторных преступлений; N_S – количество лиц, отбывших наказание, для которых существует риск совершения повторных преступлений (интенсивность совершения рецидивных преступлений для данной категории принимается равной λ_{SR}). В случае формирования благоприятных условий, например, при успешной постпенитенциарной ресоциализации лица данной категории покидают подмножество потенциальных рецидивистов (интенсивность такого перехода принимается равной λ_{SN}). Далее N_R – число лиц, ранее осужденных и являющихся потенциальными рецидивистами (интенсивность совершения повторных преступлений для данной категории принимается равной λ_{RX}). Величины N_X, N_Y, N_Z отражают, соответственно, численность группы лиц, совершивших повторные преступления (при этом факт правонарушения не установлен), количество лиц, которые совершили рецидивные преступления (в отношении которых проводятся следственные действия), и численность группы лиц, совершивших повторные преступления

и осужденных повторно. Полагаем, что повторные преступления выявляются с интенсивностью λ_{XY}, интенсивность повторного осуждения принимается равной λ_{YZ}.

Для описания динамики системы на временном интервале $[0,T]$ применим теорему А.Н. Колмогорова (непрерывное время, дискретное множеством состояний). В результате приходим к следующей системе:

$$\begin{aligned}
\frac{dN_N(t)}{dt} &= \lambda_{SN} N_S(t),\\
\frac{dN_S(t)}{dt} &= -\left(\lambda_{SN}+\lambda_{SR}\right) N_S(t),\\
\frac{dN_R(t)}{dt} &= \lambda_{SR} N_S(t) - \lambda_{RX} N_R(t),\\
\frac{dN_X(t)}{dt} &= \lambda_{RX} N_R(t) - \lambda_{XY} N_X(t),\\
\frac{dN_Y(t)}{dt} &= \lambda_{XY} N_X(t) - \lambda_{YZ} N_Y(t),\\
\frac{dN_Z(t)}{dt} &= \lambda_{YZ} N_Y(t), t \in [0,T].
\end{aligned} \tag{1}$$

Полагаем, что при $t=0$ все ранее осужденные лица относятся к одной из введенных выше групп. Доли этих групп в общей совокупности в начальный момент времени равны $\alpha_N, \alpha_S, \alpha_R$, $\alpha_N+\alpha_S+\alpha_R=1$.

Полученные соотношения позволяют определять численность введенных групп за счет возможности построения траекторий согласно следующим соотношениям ($\Delta t = T/q$, q – число точек равномерного разбиения отрезка $[0,T]$):

$$\begin{gathered}
N_N{}^{i+1} = N_N{}^{i} + \lambda_{SN} N_S{}^{i} \Delta t,\ \ N_S{}^{i+1} = N_S{}^{i} - \left(\lambda_{SN}+\lambda_{SR}\right) N_S{}^{i}(t) \Delta t,\\
N_R{}^{i+1} = N_R{}^{i} + \left(\lambda_{SR} N_S{}^{i} - \lambda_{RX} N_R{}^{i}\right) \Delta t,\ \ N_X{}^{i+1} = N_X{}^{i} + \left(\lambda_{RX} N_R{}^{i} - \lambda_{XY} N_X{}^{i}\right) \Delta t,\\
N_Y{}^{i+1} = N_Y{}^{i} + \left(\lambda_{XY} N_X{}^{i} - \lambda_{YZ} N_Y{}^{i}\right),\ N_Z{}^{i+1} = N_Z{}^{i} + \lambda_{YZ} N_Y(t) \Delta t.
\end{gathered} \tag{2}$$

На рис. 2 приведены рассчитанные траектории, построенные в среде IDE Lazarus (входные параметры приняты равными: $\alpha_N = 0,3$, $\alpha_S = 0,3$, $\alpha_R = 0,4$, $N_0 = 1000$, $\lambda_{SN} = 0,03$, $\lambda_{SR} = 0,025$, $\lambda_{RX} = 0,09$, $\lambda_{XY} = 0,04$, $\lambda_{YZ} = 0,045$, $T = 365$, $q = 1000$).

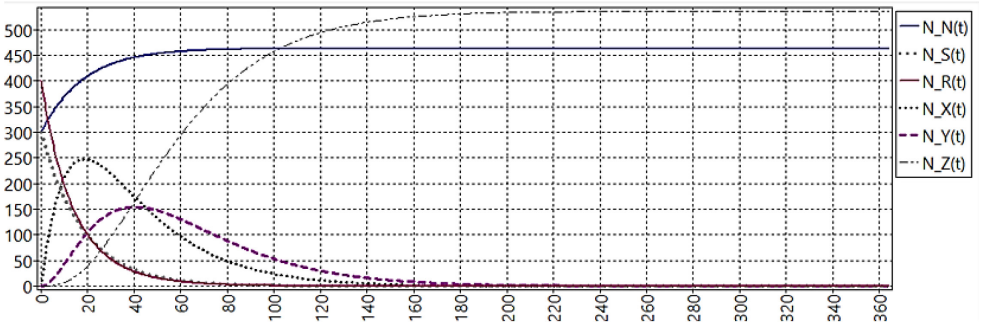


Рис. 2. – Графики траекторий $N_N(t), N_S(t), N_R(t), N_X(t), N_Y(t), N_Z(t)$

Компенсирующие мероприятия, например, работа службы пробации, усилия по трудоустройству и ресоциализации бывших осужденных, надзорные мероприятия и др., направлены на снижение повторной (рецидивной) преступности. С учетом потребности в ресурсном обеспечении таких мер путем ввода управляющих воздействий ($\lambda_{SN} = u(t)$) рассматриваемый процесс формализуется в виде задачи оптимального управления с критерием качества

$$J(u)=\int_0^T\left(c_S N_S{}^2(t)+c_R N_R{}^2(t)+\rho u^2(t)\right)\to\min, \tag{3}$$

где c_S, c_R – коэффициенты пропорциональности, ρ – условные затраты на проведение компенсирующих мероприятий по снижению уровня рецидивной преступности.

Получаем следующую задачу оптимального управления.

Требуется минимизировать функционал

$$J(u)=\int_0^T\left(c_S N_S{}^2(t)+c_R N_R{}^2(t)+\rho u^2(t)\right) \tag{4}$$

при динамических ограничениях:

$$\begin{aligned}
\frac{dN_N(t)}{dt}&=N_S(t)u(t),\\
\frac{dN_S(t)}{dt}&=-(\lambda_{SR}+u(t))N_S(t),\\
\frac{dN_R(t)}{dt}&=\lambda_{SR}N_S(t)-\lambda_{RX}N_R(t),\\
\frac{dN_X(t)}{dt}&=\lambda_{RX}N_R(t)-\lambda_{XY}N_X(t),\\
\frac{dN_Y(t)}{dt}&=\lambda_{XY}N_X(t)-\lambda_{YZ}N_Y(t),\\
\frac{dN_Z(t)}{dt}&=\lambda_{YZ}N_Y(t), t\in[0,T],
\end{aligned} \tag{5}$$

ограничениях на управление:

$$0\le u(t)\le u_{\max}, t\in[0,T], \tag{6}$$

начальных условиях:

$$\begin{aligned}
&N_N(0)=N_N^0,\quad N_S(0)=N_S^0,\quad N_R(0)=N_R^0,\\
&N_X(0)=N_X^0,\quad N_Y(0)=N_Y^0,\quad N_Z(0)=N_Z^0,\ u(0)=u^0.
\end{aligned} \tag{7}$$

Для частного случая при постоянном управлении ($u=0,0146$, $\lambda_{SR}=0,0101$, $\lambda_{RX}=0,4335$, $\lambda_{XY}=0,4346$, $\lambda_{YZ}=0,5089$, $T=30$) траектории системы $N_X(t), N_Y(t)$ принимают вид, приведенный на рис. 3.

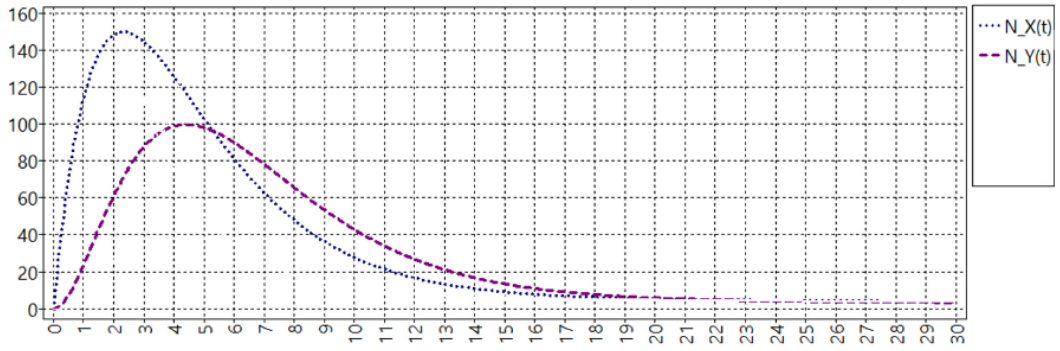


Рис. 3. – Графики $N_X(t), N_Y(t)$

Для решения полученной задачи оптимального управления доступен широкий спектр численных методов оптимизации, позволяющих строить приближенное решение для различных значений параметров [4]. Полученная модель служит повышению эффективности мероприятий, направленных на снижение рецидивной преступности с учетом выделенных ресурсов, и нацелен на формирование обоснованных управленческих решений.

Список литературы

1. *Царькова Е.Г.* Построение нейросетевой модели динамики рецидивной преступности // Научно-технический вестник Поволжья. 2024, № 7. С. 103-106.
2. *Минаев В.А.* Моделирование динамики преступности с учетом фактора латентности // Криминологический журнал. 2022, № 2. С. 67-78.
3. *Минаев В.А., Бондарь К.М.* Опыт и перспективы математического моделирования криминогенной обстановки // Криминологический журнал. 2022, № 1. С. 103110.
4. *Churakov D., Tsarkova E., Vorotnikova T., Belyaev A.* Optimal management of website under adverse impacts conditions // Journal of Physics: Conference Series: Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems, Voronezh. – Bristol: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012113.

1.2.2.

[1]К.О. Чичиров, [2]Л.Ш. Ахтямова, [3]Л.И. Киямова, [4]М.А. Закирова

[1]Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза,
[2]Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань,
[3]Российский университет дружбы народов, Москва,
[4]Московский государственный строительный университет, Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ (КРИВОЙ ХАРРИНГТОНА) ПРИ ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

Анализируется возможности применения функции желательности (кривой Харрингтона) для комплексной оценки работоспособности систем вентиляции на объектах энергетики. Приводится обоснование выбора метода, рассмотрены основные этапы формирования индекса желательности по эксплуатационным параметрам. Описан пример вычисления на основе реальных показателей работы вентиляционного оборудования. Обсуждаются перспективы внедрения метода для повышения надежности и эффективности эксплуатации энергетических объектов.

Ключевые слова: *система вентиляции, энергетика, функция желательности, кривая Харрингтона, оценка работоспособности, эксплуатационные параметры.*

Постановка задачи

Современные энергетические объекты требуют высокой надежности всех технологических систем, в том числе и систем вентиляции, обеспечивающих термическую безопасность и оптимальный микроклимат. Оценка работоспособности вентиляции обычно базируется на анализе комплекса эксплуатационных параметров, зачастую с разной размерностью и значимостью. Классические методы интеграции таких параметров не всегда позволяют дать объективную общую оценку. Функция желательности Харрингтона является универсальным инструментом для сведения разнородных критериев к единой безразмерной шкале, что актуально для задач энергетики [1,2].

Оценка работоспособности системы вентиляции предполагает учет целого ряда критериев: расход воздуха, температура подаваемого воздуха, уровень вибрации, энергопотребление и прочие параметры, которые по-разному влияют на итоговую надежность оборудования. Существующие методики часто оперируют предельными значениями или простым суммированием баллов, не учитывая выраженность отклонения каждого параметра от нормы. Необходим интегрированный показатель, позволяющий учитывать не только факт превышения контрольных границ, но и степень нежелательности отклонения каждого параметра, и их совместное влияние на итоговую работоспособность системы.

Математический пример

Пусть необходимо оценить работоспособность по двум основным параметрам: фактический расход воздуха (x_1) (м³/ч) и температура подаваемого воздуха (x_2) (°C). Для каждого параметра строится индивидуальная функция желательности Харрингтона:

$$d_i = \exp(-\exp(-b_i(y_i-a_i))),\ i=1,2$$

где (y_i) — значение i-го параметра, (a_i, b_i) — параметры кривой, соответствующие нормативным и предельным значениям.

Допустим, номинальный расход воздуха 2000 м³/ч ((x_1)), нормативный диапазон 1800–2200, у нас 1900 м³/ч. Температура 28°C ((x_2)), нормативный диапазон 20-30, критическая отметка — 35°C. Параметры кривой подобраны так, что на границе нормы (d=0,8), при превышении предела — 0,1.

Расчёт индивидуальных желательностей:

Для расхода: ($d_1 = \exp(-\exp(-0,015*(1900-2000))) = (-\exp(1,5)) \approx 0,78$

Для температуры: ($d_2 = \exp(-\exp(-0,3*(28-25))) = \exp(-\exp(-0,9)) \approx 0,56$

Итоговая объединённая желательность:

$$D = (d_1 * d_2)^{0,5} = (0,78 * 0.56)^{0,5} \approx 0,66$$

Интерпретация: система функционирует удовлетворительно, но резерв до снижения работоспособности значителен (обычно уровень $D<0,37$ указывает на ненормальное функционирование) [3].

В данном примере итоговая комплексная желательность по Харрингтону равна $D\approx0,66$. По принятой шкале это значение соответствует диапазону "хорошо" (0,63–0,80), однако оно близко к границе между "удовлетворительно" и "хорошо". Это означает, что в текущих условиях система работает стабильно: параметры микроклимата не выходят за пределы нормы, но уже заметно, что один из факторов (в данном случае температура, для которой индивидуальная желательность $d2\approx0,56$) незначительно ухудшает общее состояние — желательность этого параметра близка к границе "удовлетворительно". При дальнейшем росте температуры или снижении расхода воздуха желательность системы быстро снизится до уровня, когда работоспособность окажется под угрозой. Таким образом, ситуацию можно оценить, как в целом благоприятную, но требующую регулярного контроля и возможных корректировок для поддержания оптимальных условий.

Перспективы использования

Функция желательности Харрингтона представляет собой один из эффективных инструментов многокритериальной оптимизации и оценки комплексных объектов, таких как показатели микроклимата производственных, лабораторных или офисных помещений. Основное преимущество этого подхода заключается в возможности агрегировать несколько разнотипных факторов — таких как температура, влажность воздуха, скорость воздушных потоков, концентрация вредных веществ и т.д. — в единую числовую характеристику, отражающую общую степень соответствия среды установленным нормам или предпочтениям.

Использование функции желательности позволяет:

1. Быстро выявлять критические и узкие места в системах жизнеобеспечения помещений. Даже если по большинству параметров значения находятся в пределах нормы, низкая желательность по одному фактору существенно снизит итоговую оценку, что указывает на необходимость приоритета вмешательства именно в этом направлении.

2. Сравнивать различные варианты инженерных решений при проектировании вентиляции и отопления. С помощью функции желательности можно количественно оценить эффективность внедряемых изменений (например, выбор разных схем приточно-вытяжной вентиляции, варианты материалов утепления), ориентируясь не только на отдельные параметры, а на комплексную оценку микроклимата.

3. Автоматизировать и стандартизировать мониторинг качества воздуха. Использование интегральной функции желательности облегчает интерпретацию больших массивов данных, поступающих от датчиков “умных зданий” или промышленных контроллеров, и может быть напрямую использовано для автоматической сигнализации или управления системами жизнеобеспечения в случае нарушения комфортных условий.

4. Повышать объективность санитарно-гигиенических оценок. Жесткий критерий низкой общей желательности не позволяет игнорировать даже единичные отклонения от оптимальных значений, таким образом снижая риск ошибочной оценки рабочего или учебного микроклимата как благополучного.

В перспективе, широкое внедрение функции желательности Харрингтона в мониторинг микроклимата позволит достичь не только большей энергоэффективности инженерных систем зданий, но и роста производительности труда, профилактики профессиональных заболеваний за счет регулярного и своевременного контроля факторов среды [4].

Заключение

Метод функции желательности Харрингтона предоставляет объективный инструмент для комплексной оценки работоспособности разнородных по физической природе параметров систем вентиляции на энергетических объектах. Применение данного подхода снижает субъективизм оценки и повышает ее информативность.

Вывод

Использование функции желательности Харрингтона обеспечивает возможность интеграции разнотипных эксплуатационных показателей вентиляционных систем в единую шкалу оценки, что создает предпосылки для объективного и комплексного анализа технического состояния оборудования. Такой методический подход способствует ранней идентификации потенциальных отклонений в работе вентиляционных установок, существенно повышая информативность результатов и позволяя принимать обоснованные решения относительно дальнейшей эксплуатации и организации технического обслуживания. Благодаря этому становится возможным своевременное реагирование на возникновение признаков ухудшения состояния системы, а также оптимизация затрат на ремонт и обслуживание за счет перехода к предиктивным стратегиям управления жизненным циклом оборудования.

Внедрение данного метода в современные системы мониторинга и автоматизированного управления существенно повышает эффективность эксплуатации вентиляционного оборудования, обеспечивая его надежность, безопасность функционирования и снижая риски возникновения простоев и аварийных ситуаций.

Список литературы

1. *Абдуллазянов Э.Ю., Старцева Ю.В., Гадаборшева Т.Б., Карманов А.В., Гарькин И.Н.* Моделирование движения воздушных масс в котлованах при строительстве объектов энергетического комплекса // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 1 (61). С. 3-10.

2. *Будылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М.* Методологические подходы к синтезу сложных слабоформализуемых систем // Региональная архитектура и строительство. 2025. № 1 (62). С. 35-42

3. *Чичиров К.О., Гарькин И.Н., Боровков Д.П., Леонтьев В.А.* Техническая экспертиза: исследование систем вентиляции в торговом развлекательном центре // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2023. № 2 (44). С. 18-24.

4. *Гарькин И.Н., Гарькина И.А., Кудишина А.Э.* Оценка эффективности мониторинга состояния объектов культурного наследия // Моделирование и механика конструкций. - 2025.- № 21. - С. 167-172.

1.2.2.

[1]М.Ю. Шрейдер, [1]А.Д. Тарасов, [1]Р.Д. Сулейменова, [2]Д.В. Левченко

[1]Оренбургский государственный аграрный университет,
Институт управления рисками и комплексной безопасности,
кафедра цифровых систем обработки информации и управления,
кафедра информационной безопасности,
[2]Оренбургский институт путей сообщения – филиал ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения»,
кафедра «Общеобразовательные дисциплины»,
Оренбург, m.shr_81@mail.ru , adtarasov@mail.ru , raislu_2707.ru@mail.ru, lev_lev75@mail.ru

МЕТОД ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ГРАФОВОЙ МОДЕЛИ

Представлен метод для оценки защищенности участков объекта системой физической защиты по критерию, характеризующему невозможность для нарушителя проникнуть на территорию объекта и добраться до цели. Используется адаптированный алгоритм Дейкстры для поиска всех возможных маршрутов перемещения нарушителя по территории объекта. Оценивается вероятность несанкционированного проникновения при выборе нарушителем самого слабо защищенного маршрута.

Ключевые слова: *система физической защиты, алгоритм Дейкстры, графовая модель.*

При проектировании систем физической защиты (СФЗ) основной целью является достижение требуемой вероятности недопущения проникновения нарушителя на объект. Важно определить доступные для нелегального проникновения участки и выяснить: насколько высокая эффективность должна быть у средств СФЗ на этих участках.

Оценить защищенность участка объекта можно по критерию, характеризующему невозможность для нарушителя проникнуть на территорию объекта и добраться до своей цели. Назовем это понятие структурная защищенность.

Измерить структурную защищенность можно через определение вероятности недопущения проникновения на объект ($P_{стр}$). Используем принцип произведения вероятностей событий в случае, когда события должны произойти одновременно. Нарушитель не сможет преодолеть выбранный путь к своей цели если будет вовремя обнаружен средствами СФЗ ($P_{обн}$) и при этом задержан ($P_{зад}$). У каждого участка объекта будет свой уровень $P_{стр}$:

$$P_{стр} = P_{обн} \cdot P_{зад}.$$

Вычисление вероятностей $P_{обн}$ и $P_{зад}$ потребует определить возможности средств СФЗ, которые будут препятствовать нарушителю, на конкретном маршруте перемещения по объекту. Части маршрута, где могут быть установлены средства защиты назовём рубежами защиты. Каждый рубеж будет вносить свою долю в процесс обнаружения и задержки ($P_{обн}$ и $P_{зад}$) для выбранного критического элемента. Маршрутов движения по объекту может быть несколько и при определении $P_{стр}$ следует выбирать наименее защищенный. Для этого нужно проверить каждый имеющийся маршрут перемещения предполагаемого нарушителя и найти такой где $P_{обн}$ и $P_{зад}$ наименьшие.

Для продвижения по выбранному маршруту нарушитель должен преодолеть все рубежи защиты. Значит он одновременно не будет обнаружен всеми средствами СФЗ, которые окажутся на этих рубежах. Используем произведение вероятностей. Нужно рассчитать вероятность с которой нарушитель преодолел рубеж не подняв сигнала тревоги $Q_{обн}$:

$$Q_{обн} = 1 - P_{обн}.$$

Таким образом вероятность $P_{обн}$ для всего маршрута в целом рассчитывается как:

$$P_{обн} = 1 - Q_{обн} = 1 - \prod_{i=1}^{n} Q_{обн\,i} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_{обн\,i}), \quad (1)$$

где $P_{обн\,i}$ – вероятность обнаружения нарушителя на i-м рубеже.

$Q_{обн\,i}$ - вероятность того, что нарушитель не будет обнаружен на i-м рубеже; $Q_{обн}$ – вероятность того, что нарушитель не будет обнаружен на всём пути.

Аналогично определяем вероятность $P_{зад}$ для всего пути:

$$P_{зад} = 1 - Q_{зад} = 1 - \prod_{i=1}^{n} Q_{зад\,i} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_{зад\,i}), \quad (2)$$

где $Q_{зад}$ и $Q_{зад\,i}$ – вероятности того, что нарушитель не будет задержан на всём пути и на i-ом рубеже соответственно.

Следовательно, вычисление структурной защищенности всех критических элементов объекта включает в себя определение всех возможных маршрутов перемещения нарушителя по территории и учет всех средств СФЗ, расположенных на различных участках объекта. Используем графовую модель.

Ребрами графа определим переходы между помещениями, например, дверь, на которой может быть замок как средство СФЗ, влияющее на $P_{зад}$. Средство защиты также может быть установлено в самой вершине графа, например, камера наблюдения внутри помещения, что повлияет на $P_{обн}$. Таким образом вероятности $P_{обн}$ и $P_{зад}$ нужно определять для всех элементов графа.

Анализ всех существующих маршрутов можно провести специальной методикой. Одной из таких методик для перебора путей в графе является алгоритм Дейкстры. Принцип работы алгоритма Дейкстры: все узлы графа помечаются числом, которое равняется наименьшему расстоянию от одного узла до другого – до начальной точки пути; исходные значения чисел – метки вершин задаются равными бесконечности (то есть расстояние неизвестно); на начальной точке метка равна нулю; во время итераций алгоритма проводится пересчет всех расстояний и на каждом узле числа уточняются; после завершения работы алгоритма будут определены длины наиболее коротких маршрутов от каждого узла до начальной вершины [1].

Адаптируем алгоритм Дейкстры для поиска самого незащищенного пути нарушителя. В исходном алгоритме входными данными являются расстояния между узлами графа. Расстояния между узлами в графе объекта оцениваются не длиной, а двумя вероятностями $P_{обн}$ и $P_{зад}$. Их величины показывают защищенность рубежей защиты и в совокупности уровень защищенности всего предполагаемого пути нарушителя [2]. Таким образом необходимо дважды запускать алгоритм: в первом случае длиной ребра с номером i будет являться вероятность $P_{обн\,i}$, а во втором случае вероятность $P_{зад\,i}$. Так как длиной всего маршрута теперь является вероятность, обычное сложение длин ребер заменяется на формулы (1) и (2). Числа – метки на узлах во время итераций алгоритма вычисляем следующим образом:

$$P_{мн\,обн} = 1 - (1 - P_{м\,обн}) \cdot (1 - P_{обн\,i}),$$

где $P_{мн\,обн}$ – новое значение метки, $P_{м\,обн}$ – предыдущее значение метки, $P_{обн\,i}$ – значение вероятности на анализируемом ребре.

Алгоритм Дейкстры использует для расчётов только расстояния между узлами. Но средства защиты при анализе объекта должны быть учтены и на самих узлах, так как защита вершины графа защищает маршрут проходящий через данную зону объекта. Следовательно, вероятности $P_{обн}$ и $P_{зад}$ в узлах графа объекта, должны объединяться со значением на метке узла во время каждой итерации. Адаптируем формулу:

$$P_{мн\,обн} = 1 - (1 - P_{м\,обн}) \cdot (1 - P_{обн\,i}) \cdot (1 - P_{з\,обн}),$$

где $P_{мн\,обн}$ – новое значение метки, $P_{м\,обн}$ – предыдущее значение метки, $P_{обн\,i}$ – значение вероятности на анализируемом ребре, $P_{з\,обн}$ – значение вероятности в зоне объекта – вершине графа.

На рисунке 1 показана схема адаптированного алгоритма. За один запуск будет определен предполагаемый маршрут нарушителя, на котором он будет обнаружен с наименьшей вероятностью $P_{обн}$ [3].

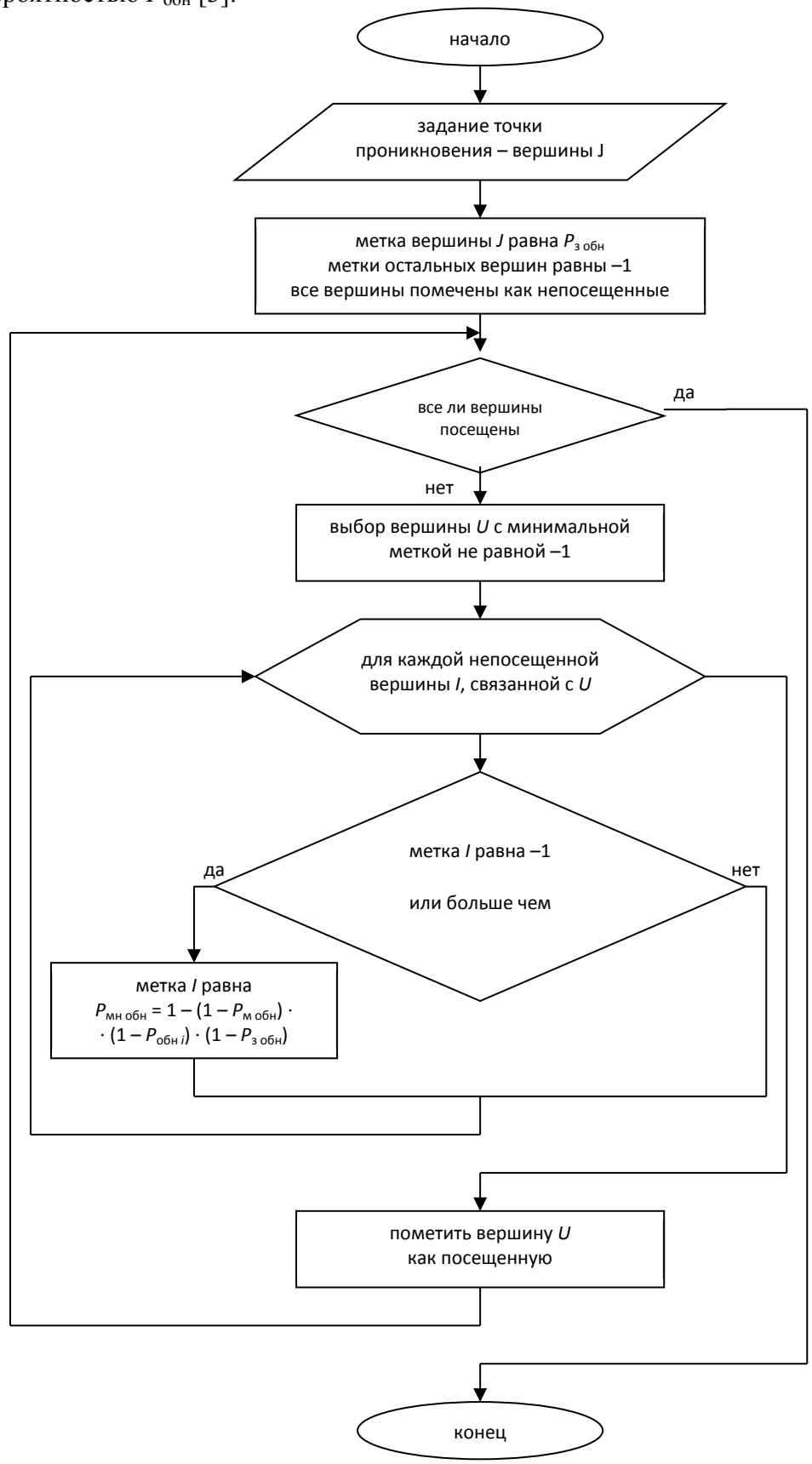


Рис. 1 – Схема адаптированного алгоритма Дейкстры

После второго запуска определится маршрут с наименьшей вероятностью задержки нарушителя $P_{зад}$. Если на объект можно проникнуть несколькими способами, алгоритм запускается отдельно для каждой начальной точки пути. Окончательная оценка структурной защищенности каждого участка объекта определяется минимальными значениями $P_{обн}$ и $P_{зад}$ полученными для различных начальных точек маршрута нарушителя.

Достоинства: Описанный метод, дает возможность оценить текущую защиту объекта, показать уязвимые места. Также можно оценить качество проектируемой системы физической защиты. Анализ всех возможных маршрутов нарушителя упрощает поиск уязвимостей на объекте с большим количеством помещений, переходов, и множеством критических элементов.

Недостатки: Требуется определение вероятностей обнаружения и задержки, для всех средств рассматриваемой СФЗ.

Список литературы

1. *Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн* Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms. - 2-е изд. - М.: «Вильямс», 2006. – 1296 с.

2. *Сулейменова Р.Д.* Использование графов в экологическом мониторинге / Р.Д. Сулейменова, Т. В. Бернгарт // В фокусе достижений молодежной науки: Материалы ежегодной итоговой научно-практической конференции, Оренбургский государственный аграрный университет, 13 ноября 2024 года. – Оренбург: ООО "Типография "Агентство Пресса", 2024. – С. 570-573.

3. *Боровский А.С., Тарасов А.Д.* Приближенная оценка защищенности потенциально-опасных объектов. Структурные параметры защищенности объектов // Программные продукты и системы, №3, 2013 г. – стр. 242-250.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ — 2.3.1.

2.3.1.

А.М. Авербух

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
учебно-научный институт радиоэлектроники и информационных технологий,
кафедра «Вычислительные системы и технологии»,
Нижний Новгород, averbukhsasha@yandex.ru

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ АЛГОРИТМА INCREMENTAL LAZY THETA* ДЛЯ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

В статье рассматривается задача построения траектории движения мобильного агента в условиях частично известной и динамически изменяющейся среды. Предлагается алгоритм incremental Lazy Theta (iLT*), сочетающий преимущества алгоритмов Theta* (построение маршрутов произвольной направленности) и D*-Lite (инкрементальное обновление пути при изменении карты). Результаты демонстрируют сбалансированные показатели iLT* по таким метрикам, как длина пути, кривизна траектории и среднее время реакции.*

Ключевые слова: *автономная навигация, частично известная карта, динамическая среда, алгоритм поиска пути, инкрементальный Lazy Theta**.

Введение. Современное развитие мобильных роботов и беспилотных систем резко увеличило потребность в надёжных алгоритмах навигации в условиях неполной и динамически изменяющейся информации о среде. При этом классические алгоритмы поиска пути на графах (например, A*[1]) требуют заранее известной полной карты и не приспособлены к изменениям во время движения. Алгоритм Theta* позволяет строить более естественные «человекоподобные» маршруты с произвольными углами поворота, но сам по себе не даёт механизмов инкрементального обновления при появлении препятствий. Алгоритм D* Lite обеспечивает быстрое перерасчёты маршрута при динамических изменениях, но ограничен ортогональной структурой сетки. Актуальность задачи заключается в необходимости комбинировать эти подходы: получить метод, который учитывает преимущества Theta* (any-angle маршруты[2]) и D* Lite (инкрементальная переработка пути[3]) при наличии лишь частичного знания карты.

Основная часть. Предлагаемый алгоритм incremental Lazy Theta* (iLT*) объединяет особенности Theta* и D* Lite. Он строит маршрут агента по мере развития карты, используя ленивую проверку видимости (Lazy Theta* [4]): соединение двух узлов прямой линией выполняется только при необходимости. При возникновении нового препятствия производится инкрементальное обновление: пересчитываются только затронутые ветви дерева пути, аналогично подходу D* Lite. Это означает, что алгоритм хранит структуру предыдущего маршрута и обновляет значения эвристических оценок g- и rhs-функций для изменений на карте. В результате удаётся сокращать количество полных перерасчётов пути. Основные этапы работы iLT*:

- Инициализация**:** агент получает начальную частичную карту и параметры (начало, цель). Выполняется поиск пути алгоритмом Lazy Theta* с учётом неизвестных ячеек.
- Движение и открытие карты: агент продвигается по построенному маршруту и постепенно обнаруживает новые препятствия (карта «раскрывается»).
- Инкрементальное обновление: при обнаружении препятствия iLT* помечает соответствующие узлы/рёбра как непроходимые и запускает процедуру перезапуска поиска,

аналогичную D* Lite, но с учётом any-angle подхода. Это позволяет быстро скорректировать маршрут без полного перебора заново.

Таким образом, iLT* реализует инкрементный поиск пути, комбинируя плюсы Lazy Theta* (короткие сглаженные маршруты) и плюсы D Lite* (эффективная адаптация к изменениям среды). Такой подход особенно важен при частично известной карте и динамике препятствий.

Симулятор навигации организован модульно для тестирования различных компонентов. Основные части системы:

- Генерация карты: создаётся двумерная прямоугольная сетка заданного размера. Ячейки могут быть проходными (0), непроходимыми (1) или неопределёнными (-1). Параметры генерации включают размеры карты и плотность препятствий. Распределение препятствий задаётся случайно при сохранении гарантированной проходимости маршрута.
- Поведение агента: агент перемещается пошагово по рассчитанному маршруту. На каждом шаге он видит окружение в локальном радиусе и может обнаружить новые препятствия, которые вносятся в карту. Если агент достигает конца известного маршрута или маршрут становится непроходимым, происходит перерасчёт.
- Система планирования: для построения маршрута используется алгоритм iLT*, а также сравниваемые алгоритмы (классический A*, Theta*, D* Lite, Lazy Theta*). Реализация на языке Python с применением стандартных библиотек: numpy для работы с сетками и координатами, matplotlib для визуализации, pandas (или csv) для сбора метрик, unittest для тестов. Ключевые структуры (списки открытых/закрытых вершин, хранение оценок g и rhs) базируются на реализациях из литературы [1][2][3][4].
- Визуализация: графический интерфейс (основанный на matplotlib) отображает текущую карту, проложенный маршрут и положение агента. Проходные клетки – белые, препятствия – чёрные, пройденный путь и позиция агента – цветные точки/линии. Обновление изображения происходит после каждого шага (с помощью plt.pause() или интерактивного режима). Это наглядно демонстрирует работу алгоритмов в динамической среде.
- Логирование и метрики: фиксируются ключевые показатели для каждой симуляции: длина пути (L), число шагов (S), время работы планировщика (T), число перерасчётов маршрута (N), кривизна пути Θ, объём используемой памяти (M).

Архитектура симулятора обеспечивает детерминированность: при одинаковых входных данных результаты повторяются (используется глубокое копирование карты и очистка сборщика мусора перед каждой попыткой).

Алгоритмы тестировались на синтетических картах размером 100×100 клеток с различной долей препятствий (20%, 25% и 30%). Результаты по основным метрикам, после 100 симуляций, сведены в таблицы 1–3. В таблицах приведены: длина маршрута L (в клетках), число узлов S в найденном пути, общее время работы T (с), среднее время пересчета пути (Tr,avg), кривизна пути Kavg (º/кл.), общий угол поворота Θ (º) и объём использованной памяти M (байт).

Таблица 1 – Результаты выполнения на картах размером 100×100 клеток с 20% препятствий

Алг.	S (шт.)	L (кл.)	T (с.)	Tr,avg (с.)	Θ (º)	Kavg (º/кл.)	M (байт)
A*	109.3838	146.617	0.9803	0.008397	1553.9	12.2	135349
T*	108.25	145.0446	1.5838	0.01394	1542.6	12.1	102536
D* lite	111.1616	147.968	1.6511	0.017551	1553.9	12.2	132458
LT*	108.25	145.0446	1.1960	0.010528	1388.7	10.7	103583
iLT*	108.25	145.0446	1.0255	0.009196	1553.4	12.2	106917

Таблица 2 – Результаты выполнения на картах размером 100×100 клеток с 25% препятствий

Алг.	S (шт.)	L (кл.)	T (с.)	Tr,avg (с.)	Θ (º)	Kavg (º/кл.)	M (байт)
A*	110.5052	147.6861	1.3419	0.011287	1729.0	13.2	139741
T*	109.3878	145.2637	1.7702	0.014831	1454.4	11.2	128152
D* lite	111.3093	147.6861	1.2938	0.060466	2007.4	15.2	136410
LT*	109.3878	145.2637	1.3751	0.011531	1454.4	11.2	129423
iLT*	110.5052	147.2349	1.0709	0.009860	1552.3	12.0	105605

Таблица 3 – Результаты выполнения на картах размером 100×100 клеток с 30% препятствий

Алг.	S (шт.)	L (кл.)	T (с.)	Tr,avg (с.)	Θ (º)	Kavg (º/кл.)	M (байт)
A*	115.4842	151.983	1.0558	0.008557	2486.3	18.2	139677
T*	113.9368	149.6726	1.6331	0.013235	1727.1	12.5	128168
D* lite	116.6316	152.8993	1.0094	0.072164	2488.2	18.0	136458
LT*	113.9368	149.6726	1.2755	0.010430	1934.5	14.4	129551
iLT*	115.0105	151.7404	0.9718	0.008577	2328.8	16.9	117725

Таким образом, iLT* обеспечивает сбалансированные результаты: при плотности препятствий 30% он получил почти наименьшую длину пути (L≈151,74) среди алгоритмов any-angle и рекордно короткое время планирования (~0,97 с) среди всех рассмотренных. Число перестроений (N) у iLT* также ниже или сопоставимо с конкурентами, благодаря инкрементальному подходу.

Заключение. Проведённая работа показала, что предложенный алгоритм iLT* успешно решает задачу автономной навигации в среде с неполной и изменяющейся информацией. Сочетание any-angle поиска (Theta*) и инкрементального обновления (D* Lite) обеспечивает алгоритму сочетание лучших свойств обоих методов: короткие, плавные маршруты и быструю адаптацию при появлении новых препятствий. Экспериментальное сравнение показало, что iLT* демонстрирует наиболее сбалансированные показатели по ключевым метрикам.

Полученные результаты подтверждают применимость алгоритма iLT* в навигационных системах мобильных роботов и других автономных платформах, работающих в условиях неполной и динамически меняющейся среды.

Список литературы

1. *Харт П.Э., Нильссон Н.Дж., Рафаэль Б.* О формальном базисе эвристического определения минимальных путей // Системы управления и кибернетика. – 1968. – Т. 4, №2. – С. 100–107.

2. *Nash A., Daniel K., Koenig S., Felner A.* Theta*: Any-Angle Path Planning on Grids // Journal of Artificial Intelligence Research. – 2007. – Vol. 39. – P. 533–579.

3. *Koenig S., Likhachev M.* D* Lite // Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence (AAAI). – 2002. – P. 476–483.

4. *Nash A., Koenig S., Tovey C.* Lazy Theta*: Any-Angle Path Planning and Path Length Analysis in 3D // Journal of Artificial Intelligence Research. – 2010. – Vol. 39. – P. 533–579.

2.3.1.

[1]М.А. Балакин, [2]А.Н. Гнатюк

[1]Ивановский государственный химико-технологический университет,
кафедра информационных технологий и цифровой экономики,
[2]Ивановский государственный энергетический университет,
кафедра программного обеспечения компьютерных систем,
abg-07@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ НА ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ ДЕВЕЛОПЕРСКОГО ПРОЕКТА

Представлена системная методика качественной оценки свойств урбанизированных территорий (участков) на этапе ***разработки идей девелоперского проекта. Методика включает*** *определение состава оценочных факторов рассматриваемого участка и влияние внешних факторов, а также формирование интегральных оценок. Предложено для создания системы поддержки принятия решений применять методы нисходящего искусственного интеллекта в виде нечеткого моделирования.*

Ключевые слова: *урбанизированная территория,* ***девелоперский проект,*** *качественные оценка, внутренние и внешние факторы, нечеткое моделирование.*

Постановка задачи

Проведение оценки свойств урбанизированных территорий необходимо при решении ряда задач: для кадастровой оценки земельных участков, для составления планов по развитию данных территорий или участков и т.д. Особое значение оценка свойств территорий или участков отводится в сравнительно новом виде деятельности, как девелопмент. **Девелопмент -** это процесс создания объектов недвижимости, который начинается с идеи и заканчивается введением объекта в эксплуатацию и его последующим управлением. В связи с этим н**а первоначальных этапах девелоперского проекта, от которых зависит успех всего дела, необходимо повести оценку и анализ свойств территории с целью:**

- разработки идеи и концепции проекта. На этом этапе формируется концепция проекта, определяются его цели и задачи. Проводится анализ, для того, чтобы понять, какие объекты востребованы, и оценить конкурентную среду;

- выбор подходящего участка для застройки. Необходимо учитывать местоположение, доступность инфраструктуры, юридические аспекты и экологические условия;

- определение участка с наиболее эффективным возможным использованием, если имеется нескольких альтернативных участков.

Под эффективностью понимается наилучший (в пределе – оптимальный) вариант выбора альтернативы по критериям «качество-цена».

Чаще всего проводится стоимостная оценка участка или территории [1], которая подразделяется на:

- кадастровую - стоимость, определяемая с использованием методов массового оценивания;

- рыночную - наиболее вероятная цена, по которой участок может быть отчуждён в условиях конкуренции;

- инвестиционную - определяется девелопером исходя из конкретных запросов и предпочтений инвесторов в использовании земельного участка в инвестиционных целях.

Однако, для качественной оценки свойств территории как слабо определенной многофакторной задачи целесообразно использовать модельное представление этой территории в виде системы взаимодействия ее свойств, которые наиболее соответствует

реальному состоянию территории в заданных условиях. Как показывает аналитический обзор методов системного анализа, оценивание сложных систем является многоэтапным процессом [2,3]. При этом можно выделить следующие этапы: определение цели оценивания; определение способов измерения величин свойств систем, существенных для целей оценивания с помощью соответствующих шкал; обоснование критериев качества и критериев эффективности функционирования системы; собственно процесс оценивания. Эти этапы настолько связаны и взаимозависимы, что они носят итерационный характер, и последовательность их выполнения может варьироваться в зависимости от вида решаемых задач.

Системная методика оценки

В общем случае, девелоперская деятельность должна обеспечивать с системной точки зрения решение двух типов задач: развитие социально-экономического состояния территории (задача анализа), когда рассматривается и оценивается состояние территорий, на которых расположены предприятия и социальные объекты, и задачи синтеза, когда решается проблема определения наиболее рационального территориального размещения вновь создаваемых социальных объектов, предприятий и инфраструктуры.

Условия или факторы собственно участка *ФС*, определяющие его социально-экономическое состояние или возможности его использования, могут быть представлены кортежем множеств [4]:

$$ФС = < И, М, Т, Э_Н, П, Э_К, В, З, С, Ж, О_Р >, \quad (1)$$

где $И$ – инфраструктурные; $М$ – материально-технические; $Т$ – транспортные; $Эн$ – энергетические; $П$ – природные; $Эк$ – экологические; $В$ – водные; $З$ – земельные; $С$ - социально обустроенность; $Ж$ – жилищное состояние; $О_Р$– *о*собенности общественно-исторического развития.

Кроме этого, необходимо учитывать взаимодействие рассматриваемой территории или участка как системы взаимодействия с внешней средой, куда входит множество факторов внешних *ФВ*:

$$ФВ = <Т_Д, И_Д, Э_О, С_О, Н_П, П_О >, \quad (2)$$

где $Т_Д$ -транспортная доступность, $И_Д$ – инфраструктурная доступность (возможность подключения к внешним инженерным сетям); $Э_О$ -экологическое окружение; $С_О$ – социальное окружение, $Н_П$ – близость населенных пунктов; $П_О$ - производственное окружение.

Такой системный подход, когда в комплексе учитываются внутренние и внешние факторы, позволяют на первом этапе в полной мере разработать идею проекта. Полученные выражения (1) и (2) определяют процесс оценки территорий или участков в общем виде. При определении возможности использования участков для конкретных целей состав факторов оценки необходимо уточнять. Рассмотрим примеры составов факторов, влияющие на первоначальную оценку земельных участков в зависимости от целевого назначения на примере Подмосковья [5,6].

Оценка земли под коттеджное строительство

Основные факторы собственно участка:

$$ФС = <Р_Н, Л_О, Э_К, Р, К_Р, Ю>, \quad (3)$$

где $Р_Н$ - расположение направления, на котором расположен участок (особую ценность представляют северо-западное и западное направления); $Л_О$ - характеристика ландшафта и почвы, качество лесного покрова и наличие водоема; $Э_К$ - экологическая обстановка; $Р$ - размер участка (приоритет отдается участкам, которые могут быть проданы частями); $Ю$ – права на участок, наличие юридических обременений. $К_Р$ - *к*атегория и разрешенное использование участка (приоритет отдается участкам в статусе земель населенных пунктов или дачного назначения).

Основные факторы внешние:

$$ФВ = <Т_Д,\ У,\ И_Д,\ Н_П>. \quad (4)$$

$Т_Д$ – транспортная доступность, близость к федеральным трассам, удобный подъезд и наличие транспортных развязок; $У$ - удаленность от МКАД; $И_Д$ – инфраструктурная доступность (возможность подключения к внешним инженерным сетям); $Н_П$ - близость населенных пунктов (повышает оценку участка).

Оценка участка под торгово-развлекательные, офисные центры

Основные факторы собственно участка:

$$ФС = < Р_Н,\ И,\ Э_Н,\ М,\ Т,\ К_Р,\ Ю>, \quad (5)$$

где $Р_Н$ - расположение направления, на котором расположен участок (особую ценность представляют северо-западное и западное направления); $И$ - степень инфраструктурной обустроенности, водоснабжение и водоотведение, теплоснабжение, интернет (оптоволоконные кабели, вышки сотовой связи) и пр.; $Э_Н$ – электрические сети электричество, газопровод и возможность подключения; $М$ - наличие искусственных преград и строений, подлежащих сносу; $Т$ – транспортная инфраструктура; $К_Р$ - категория и разрешенное использование участка; $Ю$ – права на участок, наличие юридических обременений (сервитуты, санитарные зоны, права аренды и прочее).

Основные факторы внешние:

$$ФВ = <Т_Д,\ У,\ И_Д,>. \quad (6)$$

$Т_Д$ – транспортная доступность, удобный подъезд и наличие транспортных развязок; $У$ - удаленность (от МКАД не более 5 км); $И_Д$ – инфраструктурная доступность (возможность подключения к внешним инженерным сетям).

Аналогично определяются $ФВ$ и $ФС$ участков для других целей (см., например, [5]).

Анализ выражений (1) – (6) показывает, что они включают как количественные, так и качественные факторы. Часть из них может оцениваться на бинарном уровне, но большинство требует сравнительной количественной оценки. Для этого, как правило, для получения интегральной оценки, учитывающие все значимые факторы, применяется различные виды моделей [7]:

- аддитивная модель:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \ ... + a_nx_n\ , \quad (7)$$

- мультипликативная модель:

$$y = a_1x_1 * a_2x_2 * ... * a_nx_n\ , \quad (8)$$

где y – интегральная (результирующая) оценка, x_1 – значимость оценочного фактора в баллах, a_1 – коэффициент значимости оценочного фактора, определяемый конкретными условиями применения оценочного фактора.

Исследования показывают, что оценку собственно участка с использованием факторов $ФС$ и влияние факторов $ФВ$ целесообразно производить с использованием аддитивной модели (7), а объединение этих оценок - с использование мультипликативной модели (8):

$$О_Р = О_{ФС} \times О_{ФВ}\ , \quad (9)$$

где $О_Р$ – результирующая оценка; $О_{ФС}$ - оценка собственно участка; $О_{ФВ}$ - оценка влияния внешних факторов.

Основным «измерителем» значимости факторов оценки по определенной шкале является экспертный опыт. Анализ существующих методов решения таких задач показывает, что эффективным является применение экспертных технологий, реализуемых с помощью современных методов искусственного интеллекта (ИИ). Эти методы можно разделить на два крупных класса: восходящий и нисходящий. Методы восходящего ИИ базируются, в основном, на основе нейронных сетей, для обучения которых требуется большой объем обучающих данных (датасет), что для девелоперский проектов не характерно в виду их большого различия. Из-за эго достаточно представительная статистика отсутствует. Наиболее подходящими являются нисходящие методы ИИ на основе нечеткого (fazzy) моделирования, позволяющие аналитические способности и профессиональный опыт человека формализовать в виде алгоритмической компьютерной технологии [8,9,10].

Заключение

Представленный системный подход, когда в комплексе учитываются внутренние и внешние факторы, позволяет на первом этапе в полной мере разработать идею проекта. Значимости факторов определяются на основе экспертного опыта, поэтому для создания системы поддержки принятия решений по наиболее эффективному использованию участков целесообразно использовать нечеткое моделирование.

Список литературы

1. *Румянцев Ф.П., Хавин Д.В., Бобылев В.В., Ноздрин В.В.* Оценка земли: учебное пособие. Нижний Новгород, 2003. 346 с.

2. *Гнатюк А.Б.* Совершенствование объектно-пространственного метода оценки экономического потенциала урбанизированной территории / А.Б.Гнатюк // Инновации и инвестиции – Москва – 2012. – № 5.– С. 29-32.

3. *Москвин В.Н., Соколова Т.А., Беристенов А.Т.* Специфика экспертной оценки и переоценки кадастровой и рыночной стоимости объектов недвижимости // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5, С. 113–118.

4. VescoGroup – оператор профессиональных услуг в сфере продажи и консалтинга недвижимости: «Факторы, влияющие на стоимость земельных участков», URL: https://vesco.ru/.

5. Отчет №З -06/08-22 об оценке справедливой стоимости земельного участка Адрес: Россия, Московская обл, Красногорский район, вблизи мкр. Опалиха г. Красногорска, URL: www.fbaugust.ru

6. *Глушкова О.В., Гагина И.С.* Анализ методики государственной кадастровой оценки земель населённых пунктов на примере г.Саратова // Агрофорсайт, 2021, №1 URL: http://agroforsait.ru/

7. *Zadeh L.A.* Possibility theory versus probability theory in decision analysis // IEEE Conf. of Decision and Control: Proc. 1977. New Orleans. 1977. P. 1267 – 1269.

8. *Sewastianow P., Rog P.* Fuzzy modeling of manufacturing and logistic systems // Mathematics and Computers in Simulation. 2003. 63. P. 569-585.

9. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление /пер. с англ. - М.: Лаборатория знаний, 2024, 801 с.

2.3.1.

П.П. Вепрева, О.П. Тимофеева канд. техн. наук

Нижегородский государственный технический университет им.Р.Е. Алексеева,
институт радиоэлектроники и информационных технологий,
кафедра информатики и систем управления,
Нижний Новгород, vepreva.pp.03@mail.ru, optimofeeva@mail.ru

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

В статье описывается создание программного обеспечения, используемого для преобразования полученных от интерферометра данных – результатов измерения оптической поверхности. Разработка программного обеспечения, приводящего данные, полученные с интерферометра, к единому формату и позволяющего проводить их последующую обработку, является актуальной практически значимой задачей. Программное обеспечение позволяет автоматизировать обработку данных и имеет возможность сохранять результаты, тем самым оптимизируя рабочий процесс.

Ключевые слова: *интерферометр, DATX, XYZ, Nan, RMS, PV, график, фильтр, Python, json.*

Введение

В таких областях, как научные исследования, инженерия и медицина, где явление интерферометрии играет важную роль, существует необходимость в обработке информации, поступающей от интерферометра. Интерферометр – это измерительный прибор, действие которого основано на явлении интерференции, позволяющий измерять плоскостность и параллельность (шероховатость) поверхностей.

Целью работы является создание программного обеспечения, которое позволит получить интерференционную картинку оптической поверхности, проделать с данными цепочку действий по приведению их к единому формату, фильтрации и сохранению, что существенно уменьшит общее время, затраченное на выполнение этих действий. В результате применения программы пользователь получит интерференционную картинку, созданную в результате измерения поверхности (исходный файл), и соответствующую ей картинку, полученную после применения фильтрации (отфильтрованный файл), удобные для анализа результатов, а также полное описание примененных средств фильтрации.

Форматы данных

В ходе работы использовался интерферометр Zygo HD, он имеет возможность сохранения результатов в разных файловых форматах, они определяются устройством, что создает сложности для последующей обработки данных, т.к. используемый интерферометр может сохранить файл с результатами измерения поверхности в формате DATX, либо в формате XYZ.

Формат DATX отличается от XYZ тем, что для его чтения не существует библиотек или иных других решений с открытым исходным кодом.

Файлы формата DATX могут хранить наборы данных и группы. Данные подобных форматов состоят из заголовка, раздела данных и трейлера, получается структура аналогичная json-формату. Необходимые сведения об оптической поверхности хранятся в разделе данных. При попытке преобразования их в матрицу зачастую она оказывается сингулярной, что не позволяет проводить их дальнейшую обработку данных. Для решения этой проблемы должен происходить анализ значений для того, чтобы обнаружить и удалить достаточно большие и маленькие значения. Поэтому для обработки данных было принято решение использовать пакет h5py.

Формат XYZ – это простой текстовый формат, который используется для хранения координатных данных о трехмерном пространстве. Эти данные так же требуют обработки для удаления неопределенных значений, которые в языке программирования Python, используемом для разработки, обозначаются как Nan. Этот заполнитель может быть заменен другим значением или удален вовсе. При работе с файлами XYZ достаточно считывать координаты точек построчно. При этом столбец *z* несет значительную смысловую нагрузку, так как для построения двумерного графика он будет являться цветовым индикатором неровностей поверхности, считанной интерферометром.

На следующем этапе решения было определено, каким образом будут отображаться числовые значения из файлов. В результате был сделан выбор в пользу библиотеки Plotly, причем она оказалась быстрее библиотек Matplotlib, Seaborn и Bokeh почти в 10 раз.

Методы фильтрации данных

Одной из главных функций разработанного программного обеспечения является применение различных фильтров к полученному изображению. В ходе работы были реализованы фильтр Винера, гауссов фильтр, фильтр Савицкого-Голея, медианный и биномиальный фильтры, каждый из которых предназначен для решения специфических задач обработки сигналов и изображений [1-2]. Так фильтр Винера — это адаптивный фильтр, который минимизирует среднеквадратичную ошибку между исходным и восстановленным сигналом. Гауссов фильтр использует гауссову функцию для размытия, эффективно уменьшая высокочастотный шум. Биномиальный фильтр основан на биномиальном распределении и часто применяется для создания размытия. Медианный фильтр — это нелинейный фильтр, который хорошо подходит для обработки изображений с шумом типа «соль и перец». Фильтр Савицкого-Голея применяет полиномиальную регрессию для локального сглаживания, позволяя сохранять важные детали поверхности.

Оценка качества измеряемой поверхности проводится с помощью критериев RMS и PV, где RMS (root mean square) - это среднеквадратичное значение по всей площади апертуры отклонение волнового фронта; PV (peak to valley) - разница между максимальными отклонениями волнового фронта, формирующего изображение. Критерии RMS и PV рассчитываются по полученному изображению и используются для обнаружения аномалий в данных [3]. Последующее применение фильтрации позволяет избавиться от аномалий (шумов, артефактов, всплесков данных).

Рассмотрим один из файлов, полученных от интерферометра, чтобы обработать данные и проанализировать, какой из фильтров окажется наиболее эффективным для решения поставленной задачи – привести критерий среднеквадратичного отклонения (RMS) к определенному значению. После загрузки файла с координатами точек измеренной интерферометром поверхности показатели качества PV и RMS получились равными 25.07 нм и 1.37 нм соответственно (рис.1). Задача заключается в том, чтобы с помощью фильтрации уменьшить значение RMS до 1 нм.

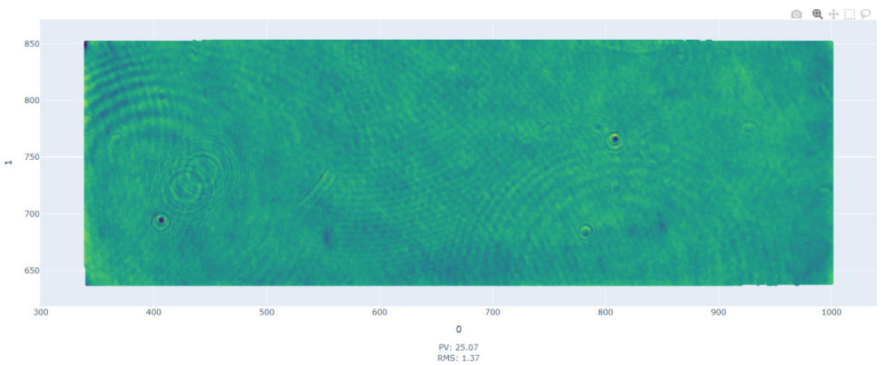


Рис. 1 - Файл измеренной поверхности

Для анализа результатов рассмотрим применение двух фильтров.

Фильтр Гаусса использует одноименную функцию, которая на вход ожидает число, являющееся шириной гауссовского ядра и стандартным отклонением, с помощью которого

сглаживается картинка. Соответственно, чем больше число, тем сильнее сглажено изображение (рис. 2). В данном решении параметр фильтра был равен 5. Измеряемые критерии получились равными: PV=7.17 нм, RMS= 1.08 нм.

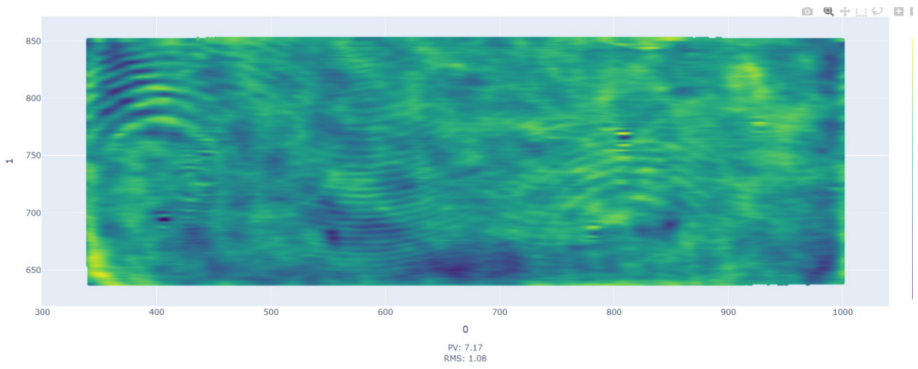


Рис. 2 - Результат применения фильтра Гаусса

Фильтр Савицкого-Голея использует полиномиальную регрессию для сглаживания данных, применяя полином заданного порядка к окну значений (рис. 3). На вход фильтра подаются размер окна и порядок полинома. Чем больше размер окна, тем сильнее сглаживание. Фильтр эффективно сохраняет формы и пики в данных, что делает его популярным для обработки сигналов и изображений. Получены критерии: PV = 7.15 нм, RMS = 1.00 нм.

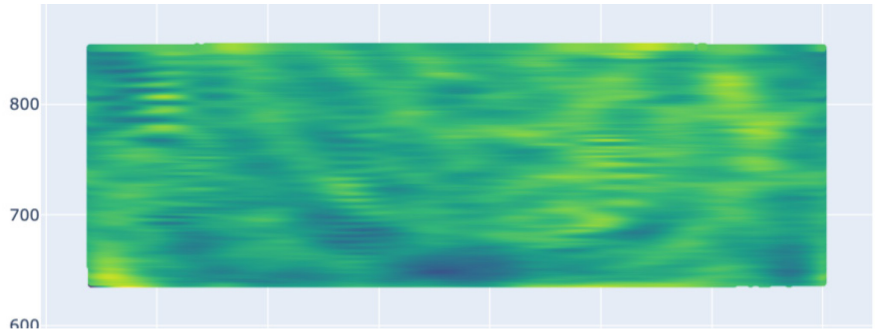


Рис. 3 - Результат применении фильтра Савицкого-Голея

По результатам анализа применения двух разных фильтров можно сделать вывод, что фильтр Савицкого-Голея показал требуемое значение критерия RMS, т.е. лучше гауссова фильтра справился с задачей.

Заключение

В разработанном программном обеспечении все этапы работы с информацией, предоставляемой интерферометром, были собраны в одном программном пакете с графической оболочкой. Итогом работы являются файлы формата html, которые сохраняются в базу данных.

Разработанное программное обеспечение представляет собой мощный инструмент для автоматизации процессов обработки данных, полученных от интерферометров, что позволяет ускорить технологический процесс. Кроме того, программа может быть настроена для работы с различными типами интерферометров и интегрирована с другими программными средствами, что позволяет создавать более сложные системы для обработки данных.

Список литературы

1. *Шахтарин Б.И.* Фильтры Винера и Калмана. Учебное пособие для вузов. 2-е изд., 2014, 408 стр.

2. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений: Пер. с англ./Под ред //Чочиа ПАМ: Техносфера. – 2005. – Т. 1072.

3. *Губанова Л.А.* Фотоника поверхности и её основные свойства – СПб: Университет ИТМО, 2022. – 68 с.

2.3.1.

[1]И.Ю. Гапицонов, [1]А.Г. Жихарев д-р техн. наук, [1]Е.К. Кабанов,
[2]А.В. Кузнецов д-р филос. наук, [2]А.А. Дрога

[1]Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
институт инженерных и цифровых технологий,
кафедра прикладной информатики и информационных технологий,
gapitsonov@mail.ru, zhikharev@bsuedu.ru,
[2]Белгородский юридический институт МВД России имени И.Д. Путилина,
кафедра информационно-компьютерных технологий
в деятельности органов внутренних дел,
kuzandr@mail.ru

МЕТОД СИСТЕМНО-ОБЪЕКТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЕКТОВ КОМЛПЕКСНОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ

В работе рассматривается новый метод системно-объектного моделирования проектов комплексного развития территории, который позволяет сформировать необходимое информационно-аналитическое обеспечение процедур управления такими проектами. В работе применяется теория системно-объектного моделирования сложных систем, на основе которой предложен новый способ формализованного представления проекта комплексного развития территории, учитывающий стоимостные и временные параметры. Разработанный метод позволяет прогнозировать процесс реализации и управление вышеупомянутыми проектами.

Ключевые слова: *сложная система, управление проектом, системно-объектная модель, системный подход.*

Современное развитие инструментария автоматизации проектного управления [1] выявило критический методологический разрыв между эвристическими подходами к проектированию социотехнических систем и возможностями их формальной спецификации. Отмечается дефицит графовых моделей, интегрирующих аксиоматическое описание процессной семантики организационно-технических структур. Данный репрезентационный пробел препятствует реализации алгоритмических процедур оптимизации и протоколов системной реконфигурации, детерминирующих вычислительную осуществимость управления сложными системами. Подобный инструментарий необходим для автоматизации процедур оптимизации и реорганизации моделируемых систем.

Рассмотрим некоторые подходы к формализации организационно-технических систем в строительной сфере. При этом необходимо отметить детерминирующие требования к подобному формальному аппарату. Первая группа требований обусловлена необходимостью имплементации системно-объектной парадигмы [2], для моделирования организационно-технических систем. С целью комплексного моделирования проектов в сфере строительства и развития территорий для адекватного описания и прогнозирования завершенности и сроков проекта в моделях необходимо учитывать структурные параметры проекты (организационная часть), функциональные параметры проекта (перечень работ проекта), объектные параметры (участники проекта и инструменты достижения результатов проекта). Таким образом, формальный аппарат описания организационно-технических систем должен обеспечивать учет структурных, функциональных и объектных параметров проекта [3] для достижения когерентного моделирования и временного прогнозирования проектов территориального развития. Вторая группа требования связана со спецификой предметной области, а именно, строительные проекты вообще, проекты комплексного развития территории характеризуются стохастичностью ресурсно-временных параметров,

проявляющейся в неконтролируемом росте бюджетных аномалий и хроноструктурных сдвигов реализации, каузальность которых эксплицирована в [4]. Для обеспечения прогностической верификации ресурсно-хронометрических показателей проектов комплексного развития территорий (КРТ) формальный аппарат должен имплементировать механизм инкорпорации указанных доменных параметров в онтологию модели. Иными словами, с целью прогнозирования данных ключевых параметров строительных проектов, разрабатываемый формальный аппарат должен обеспечивать учет данных параметров проекта.

Рассмотрим подробнее исчисление систем как функциональных объектов, предложенное в работе [3]. Данное исчисление представляет собой гибридный формальный аппарат, который базируется на теории графов [5], теории объектов [6] и исчислении процессов [7]. Декомпозиция указанных формальных оснований выявляет их комплементарность при репрезентации структурных, функциональных и объектно-ориентированных атрибутов системы. Данная конвергенция детерминирует эмерджентные свойства интегративной формализации, где системное исчисление реализует синтез перечисленных математических аппаратов.

В рамках исчисления систем, как функциональных объектов, система (проект комплексного развития территории) может быть представлен в виде специального объекта теории объектов Аббади-Карделли (далее – *узловой объект*):

$$\mathbf{s_i = [(L?, L!)}; \mathbf{L!=f(L?)}; \mathbf{(O?, O!, Of)],} \quad (1)$$

где:

- $\mathbf{s_i}$ – произвольная система;
- **(L?, L!)** – структурные параметры системы или ее интерфейс, который состоит из двух множеств: множество входящих потоковых объектов **L?** и множество исходящих потоковых объектов **L!**. Элементы данных множеств представляют собой специальные объекты без методов (далее – *потоковые объекты*), подробнее рассмотрим их далее;
- **L!=f(L?)** – метод узлового объекта, который содержит описание процедуры преобразования входящих потоковых объектов в исходящие;
- **(O?, O!, Of)** – объектные параметры системы представлены в виде трех множеств: **O?** и **O!** объектные параметры, характеризующие пропускную способность портов системы, **Of** – множество параметров объекта, реализующего функцию моделируемой системы.

В рамках системно-объектной онтологии предметной области идентифицируется класс потоковых объектов — специализированных безметодных сущностей в терминологии теории объектов Аббади-Карделли, репрезентируемых исключительно атрибутивными кортежами (состоит из полей). Агрегация данных сущностей конституирует формальное множество потоковых объектов системно-объектной модели, которое имеет вид, как показано ниже:

$$\mathbf{L = \{l|l=[r_1, \ldots, r_n]\},} \quad (2)$$

где **l** – именованный потоковый объект, который состоит из множества пар $\mathbf{r_n}$, имеющие вид «параметр»:«значение параметра».

Необходимо отметить, что объектные параметры, связанные с пропускной способностью, чаще имеют существенное значение при моделировании именно технических систем, которые имеют определенные параметры подключения сторонних агрегатов. С точки зрения моделирования вопросов управления проектами в строительной сфере данные объектные характеристики отдельно выделять не будем. В случае необходимости, они могут быть заданы в множестве объектных параметров. При этом, как было отмечено выше, для рассматриваемой предметной области важнейшими параметрами являются параметры стоимости и времени. Говоря о стоимости, с точки зрения описания системы, будем иметь ввиду затраты, которые необходимо понести системе для реализации функции. С данной точки зрения, если реализация функции требует финансовых вложений, этот аспект можно

учесть в виде отдельного потокового объекта, характеризующего финансовые ресурсы с соответствующим параметром, описывающим объем финансовых ресурсов. В тоже время, очевидным является утверждение, что любая подсистема всегда имеет определенный уровень затрат на свое функционирование. Поэтом у каждой подсистемы на диаграмме, обязательно должен быть отображен потоковый объект, описывающий финансовые ресурсы. С целью упрощения графоаналитических моделей проектов комплексного развития территорий, введем специальный объектный параметр, описывающих стоимость реализации системой своей функции и обозначим его как **Op.** Аналогично стоимости реализации функции системы введем специальный объектный параметр, описывающий время, которое тратит система на реализацию своей функции **Ot.** Очевидно, что параметры времени и стоимости реализации функции напрямую связаны с объектом, который реализует функцию. В качестве примера можно рассмотреть систему обеспечения запасов строительных материалов на складе. Например, по условию, подсистема обеспечения запасов должна обеспечивать наличие на складе не менее ста условных единиц определенного строительного материала. При этом, логика пополнения запасов следующая: если объем запасов меньше или равен нижней критической границе – **x**, тогда необходимо организовать доставку строительного материала в объеме не меньшем 100-**x.** Для подобной подсистемы стоимость доставки **n** условных единиц строительного материала будет фиксированной и зависит от поставщика строительного материала. Время доставки **n** условных единиц строительного материала также зависит от поставщика и его возможностей. Такую подсистему можно описать следующим выражением:

$$\mathbf{s = [(l_{бсм}, l_{ппн}); l_{ппн} = f(l_{ппн}); (Op, Ot, Of)],} \quad (3)$$

где:

- $\mathbf{l_{бсм}}$ – потоковый объект «баланс строительного материала» который имеет вид $\mathbf{l_{бсм}}$**=[баланс];**
- $\mathbf{l_{ппн}}$ – потоковый объект «приемо-передаточная накладная» который имеет вид $\mathbf{l_{ппн}}$**=[объем].**

В примере системы, описанной выражением (3) оценить стоимость реализации метода возможно зная количество доставляемого строительного материала, например, если баланс строительного материала составляет 30 единиц, тогда, исходя из логики реализации данного метода, описанного выше, необходимо заказать 70 единиц строительного материала. Допустим, доставка строительного материала однократно достигает 8 часов, т.е. **Ot**=8, стоимость доставки 20 единиц строительного материала (в данной подсистеме мы не учитываем стоимость самого материала, так как это не входит в «круг обязанностей» рассматриваемой подсистемы) равна 2 000 рублей, т.е. **Op**=((100-$\mathbf{l_{бсм}}$)/20)*2000. Т.е. метод данного узлового объекта должен содержать операторы, предполагающие расчет общей стоимости реализации метода узлового объекта, а также времени, затрачиваемого на реализацию функции узлового объекта. Поэтому, объектные параметры **Op, Ot** в случае имитационного системно-объектного моделирования могут корректироваться методом узлового объекта, если они должны отражать текущую стоимость и время, затрачиваемое на реализацию метода системы в текущем состоянии, определяемом значениями параметров потоковых объектов системы. Таким образом, данные объектные параметры должны быть инициализированы постоянными значениями, зависящими от объекта (в рассматриваемом случае – поставщика строительных материалов). Таким образом, в качестве формального представления проекта комплексного развития территории как системы будем использовать выражение 4, которое учитывает все необходимые характеристики такой системы:

$$\mathbf{s_{крт} = [(L?, L!); L! = f(L?); (Op, Ot, Of)],} \quad (4)$$

Графический формализм проекта комплексного развития территории как системы показан на схеме ниже:

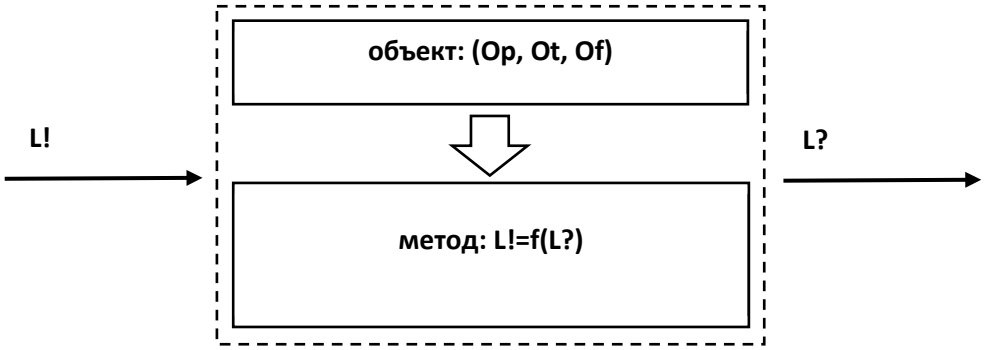


Рис. 1 – Графический формализм проекта как системы

Выражение 4 отвечает всем требованиям, описанным выше: интерфейс узлового объекта позволяет в полной мере учесть структурные характеристики системы, метод узлового объекта отражает функциональные параметры моделируемого объекта, множества объектных параметров позволяют учесть объектные параметры системы, причем, выделенные объектные параметры стоимости и временных затрат позволяют учесть в модели данные ключевые параметры для проектов с строительной сфере.

Необходимо отметить, что рассмотренные выше специальные объектные параметры, отражающие время и стоимость реализации подсистемой своей функции, не отражают стоимость ресурсов, используемых для реализации метода узлового объекта. Видится очевидным, что любые потоковые объекты, используемые системой в качестве ресурсов (входящие по отношения к рассматриваемой системе) имеют некоторую стоимость, тогда для учета стоимости потоковых объектов введем в структуру потокового объекта обязательное поле для учета стоимости условной единицы потокового объекта. Тогда формальный вид потокового объекта примет вид:

$$\mathbf{L = \{l|l=[r, \ldots, r_n, r_p]\},} \quad (5)$$

где $\mathbf{r_p}$ – поле потокового объекта, отражающее стоимость условной единицы потокового объекта. Для расчета общей стоимости условного ресурса, описываемого потоковым объектом, также необходимо иметь информацию о количестве ресурса. Подобные вопросы необходимо учитывать при проектировании системно-объектной модели, для чего необходимы соответствующие формальные процедуры, которые будут рассматриваться в рамках дальнейшего исследования.

Предложенный формальный аппарат позволяет описать проект комплексного развития территории как специальный узловой объект, который, в свою очередь, позволяет учесть его организационную функциональную и объектную структуры, что соответствует предъявляемым требованиям к формальному обеспечение метода системно-объектного моделирования проектов комплексного развития территории. Полученные результаты открывают перспективу разработки автоматизированных способов верификации и оптимизации проектов комплексного развития территории.

Список литературы

1. *Величко Вячеслав Витальевич.* Практика управления строительными проектами / В. В. Величко, И. Г. Забабурина, Г. В. Попков. - Москва : Горячая линия - Телеком, 2020. - 393 с.

2. *Жихарев Александр Геннадиевич.* Методы и средства Системно-объектного моделирования структуры и функций сложных систем : диссертация ... доктора технических наук : 2.3.1. / Жихарев Александр Геннадиевич; [Место защиты: ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»]. - Белгород, 2022. - 374 с.

3. *Zhikharev A.G.* System-Object Approach to Modeling Organizational Knowledge Considering General System-Level Patterns. Sci. Tech. Inf. Proc. 49, 497–505 (2022). https://doi.org/10.3103/S0147688222060120.

4. *Гапицонов И.Ю., Жихарев А.Г., Бобышев П.П.* Перспективы применения теории системно-объектного моделирования в управлении проектами / Цифровые, компьютерные и информационные технологии в науке и образовании: Сборник статей II Межрегиональной научно-практической конференции с международным участием. – Брянск, 2025. – С. 217-223.

5. *Харари Фрэнк.* Теория графов = Graph Theory : Graph Theory / ф. Харари ; пер. с англ. и предисл. В. П. Козырева ; под ред. Г. П. Гаврилова. - 3-е стер. изд. - Москва : КомКнига : УРСС, 2006. - 300 с.

6. Abadi Martin and Luca Cardelli A. Theory of Objects. – Springer-Verlag. – 1996. – 397 p.

7. *Milner R.:* A Calculus of Communicating Systems. Number 92 in Lecture Notes in Computer Science. Springer Verlag, 1980.

2.3.1.

К.Е. Долженко, А.В. Кожина, Д.Р. Новиков, В.Р. Козлов

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева»,
Институт информатики и телекоммуникаций,
кафедра системного анализа и исследования операций,
Красноярск, kardol428@gmail.com

АЛГОРИТМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В данной работе приведены результаты решений задач машинного обучения с использованием алгоритма дифференциальной эволюции для настройки гиперпараметров. Исследования эффективности реализованных решений производились на типичных для тестирования наборах данных с различной структурой и сложностью. Проведенные эксперименты показали перспективность использования алгоритма дифференциальной эволюции в области машинного обучения и возможности для дальнейших исследований.

Ключевые слова: *алгоритм, дифференциальная эволюция, методы оптимизации, машинное обучение, эффективность.*

Введение

Современные задачи машинного обучения требуют высокоэффективных методов, способных работать с большими объемами данных, сложными структурами и нелинейными зависимостями. Одним из способов повышения эффективности методов является настройка гиперпараметров. Ручная настройка гиперпараметров требует значительных затрат временных ресурсов и глубоких знаний предметной области. Для автоматизации данного процесса можно использовать методы глобальной оптимизации. Алгоритм дифференциальной эволюции представляет собой мощный инструмент глобальной оптимизации, основанный на принципах эволюционных алгоритмов. В данной статье рассматривается применение дифференциальной эволюции для решения задач кластеризации, классификации и аппроксимации [1].

Цель работы

Целью данной работы является повышение эффективности решений задач машинного обучения за счет настройки параметров при помощи алгоритма дифференциальной эволюции. Было проведено экспериментальное исследование эффективности реализованных решений и был проведен анализ полученных результатов. При исследовании вычислительные ресурсы изменялись в зависимости от задачи. Для каждой из задач была проведена серия из 30 запусков.

Задача кластеризации

Кластеризация – задача разбиения данных на однородные группы (кластеры) на основе мер схожести. Для решения данной задачи был разработан алгоритм кластеризации, основанный на функции плотности вероятностей. В разработанном алгоритме функция плотности вероятностей представляла собой нормальное распределение, параметры которой (математическое ожидание и стандартное отклонение) подбирались алгоритмом дифференциальной эволюцией.

Тестовые задачи были сгенерированы искусственно. Выборки для тестирования представляют собой как данные с простыми структурами («Круглые кластеры»), так и данные со сложными формами («Лунообразные кластеры», «Кольцо в кольце», «Смешанные кластеры»).

Для оценки эффективности алгоритма кластеризации был использован коэффициент силуэта. Результаты тестирования реализованного алгоритма приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты тестирования алгоритма кластеризации с применением дифференциальной эволюции

Название выборки	Среднее арифметическое значение коэффициента силуэта
Выборка с кругообразными кластерами	0,91610721
Выборка с лунообразными кластерами	0,46310732
Выборка с кластерами «Кольцо в кольце»	0,35378255
Выборка со смешанными кластерами	0,48154775

Проведенное экспериментальное исследование эффективности алгоритма кластеризации с использованием дифференциальной эволюции продемонстрировало выдающиеся результаты на данных с линейно разделимыми и четко выраженными кластерами (кругообразные кластеры). С увеличением сложности структуры данных (лунообразные кластеры, кластеры «Кольцо в кольце» и смешанные кластеры) качество кластеризации снижалось. Для повышения эффективности данного алгоритма на сложных данных целесообразно исследовать возможность комбинации реализованного алгоритма с другими методами кластеризации.

Задача классификации

Классификация – задача присвоения объектам меток классов на основе признаков данных объектов. Для решения задачи классификации был разработан нечетко-эволюционный алгоритм, основанный на нечеткой системе классификации. В разработанном алгоритме классификации функция принадлежности представляла собой Гауссову функцию, параметры которой (центр и ширина) подбирались алгоритмом дифференциальной эволюцией [2].

В качестве тестовых задач были выбраны: «Iris Dataset», «Australian Credit Approval Dataset», «German Credit Dataset», «Wine Quality» [3]. Данные задачи представляют собой данные различной структуры и сложности.

Для оценки эффективности алгоритма классификации было использовано множество типичных метрик (Accuracy, Precision, Recall, F1-мера). Результаты тестирования реализованного алгоритма представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты тестирования алгоритма классификации с применением дифференциальной эволюции

Accuracy	Precision	Recall	F1-мера
«Iris Dataset»			
1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
«Australian Credit Approval Dataset»			
0,7985	0,8038	0,7306	0,7493
«German Credit Dataset»			
0,7860	0,7452	0,7866	0,7501
«Wine Quality»			
0,8308	0,7214	0,8308	0,7590

Проведенное экспериментальное исследование эффективности алгоритма классификации с использованием дифференциальной эволюции продемонстрировало наивысшую эффективность алгоритма на линейно разделимых и хорошо структурированных данных («Iris Dataset»). С увеличением сложности данных («Australian Credit Approval Dataset», «German Credit Dataset», «Wine Quality») значения метрик снизилось, однако результаты остались на конкурентоспособном уровне. Для повышения эффективности данного алгоритма на сложных данных следует исследовать область настройки параметров, подбиравшихся вручную.

Задача аппроксимации

Аппроксимация – задача замены одного математического объекта другим, в том или ином смысле близкого к исходному. Для решения данной задачи был разработан алгоритм

аппроксимации, основанный на нелинейной регрессии, коэффициенты которой подбирались алгоритмом дифференциальной эволюции.

Тестовые задачи были сгенерированы искусственно. Функции для тестирования представляют собой данные как с простой структурой (линейная функция), так и со сложной структурой с нелинейной зависимостью (полиномиальная, синусоидальная и комбинированная функции).

Для оценки эффективности алгоритма аппроксимации была использована среднеквадратичная ошибка. Результаты тестирования реализованного алгоритма представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты тестирования алгоритма аппроксимации с применением дифференциальной эволюции

Вид функции	Усредненное значение среднеквадратичной ошибки
Линейная функция	0,8767
Полиномиальная функция	0,8219
Синусоидальная функция	0,8374
Комбинированная функция	0,8536

Проведенное экспериментальное исследование эффективности алгоритма аппроксимации с использованием дифференциальной эволюции продемонстрировало наивысшую эффективность алгоритма на линейной функции. Однако на более сложных функциях реализованный алгоритм также имеет значительные результаты.

Заключение

Проведенное экспериментальное исследование эффективности решений задач машинного обучения с использованием алгоритма дифференциальной эволюции показало, что применение дифференциальной эволюции для методов машинного обучения эффективно для данных с простой структурой. Для данных со сложной структурой реализованные методы требуют дополнительной настройки и исследований.

Список литературы

1. *Ryzhikov I., Semenkin E., Panfilov I.* Evolutionary optimization algorithms for differential equation parameters, initial value and order identification – В сборнике: ICINCO 2016 - Proceedings of the 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. 13. 2016. С. 168-176.

2. *Лунева А.А, Лунева С.Ю.* Применение модифицированного метода дифференциальной эволюции для оптимизации нечетких систем – Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 12. С. 316-319

3. UCI Machine Learning Repository. Australian Credit Approval Dataset, German Credit Data, Wine Quality Dataset. Доступно в Интернете: https://archive.ics.uci.edu/ml/index.php (дата обращения: 28 июня 2025 года)

2.3.1.

[1]Д.С.Карпович, [2]Л.Э. Петросян канд. экон. наук

[1]РТУ МИРЭА, ИИТ,
karpovich1310@gmail.com,
[2]РТУ МИРЭА,
кафедра МОСИТ

ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ КОНТИНГЕНТА ОБУЧАЮЩИХСЯ В ВУЗАХ

Динамика движения контингента обучающихся (студентов, магистрантов, аспирантов) является важным индикатором эффективности образовательной системы, отражающим потери и сохранность кадров в процессе обучения. В статье проводится системный анализ факторов, влияющих на отток и удержание обучающихся в техническом вузе, включая академическую успеваемость, социально-экономические условия и адаптационные механизмы. Особое внимание уделяется методам статистического моделирования и анализу данных для прогнозирования и снижения оттока. Рассматривается пример применения цифровых инструментов мониторинга для повышения сохранности контингента.

Ключевые слова: *динамика контингента, отток студентов, сохранность обучающихся, системный анализ, управление образованием, статистическое моделирование.*

Введение

Современное высшее образование сталкивается с вызовом: сохранение студенческого контингента в условиях взаимодействия академических, социальных и экономических факторов. Динамика оттока обучающихся — от бакалавриата до аспирантуры — отражает не только внутренние проблемы вузов, но и внешние трансформации рынка труда, технологий и демографических трендов. Статистика показывает, что до 40% [1] студентов технических специальностей не завершают обучение, а магистранты и аспиранты сталкиваются с «академическим транзитом» и профессиональными альтернативами. В этой ситуации системный анализ становится ключевым инструментом для выявления причин потерь и разработки стратегий их минимизации. Цель исследования — проанализировать ключевые факторы динамики контингента, эффективные механизмы управления и перспективы оптимизации образовательных процессов, учитывая опыт ведущих вузов.

Динамика движения контингента представляет собой сложный многофакторный процесс, требующий системного изучения. В рамках данного исследования рассматриваются ключевые аспекты этой проблемы:

- Количественные показатели оттока обучающихся на разных уровнях образования;
- Факторы, влияющие на сохранность контингента;
- Эффективные механизмы минимизации потерь.

Системный анализ динамики контингента: факторы и механизмы сохранности

Современные исследования динамики студенческого контингента выявляют устойчивые паттерны, свидетельствующие о структурной трансформации высшей школы. На примере технических вузов прослеживается тревожная тенденция: каждый третий студент бакалавриата прерывает образовательную траекторию, причем пик оттока приходится на переход между вторым и третьим курсами. Этот феномен, известный в академической литературе как "кризис среднего цикла", связан с академической усталостью и разрывом между теорией и профессиональными ожиданиями. В естественнонаучных направлениях отсев достигает 40%[2] — вдвое выше, чем в гуманитарных.

В магистратуре рост числа поступающих сочетается со снижением доли выпускников из-за "эффекта академического транзита", когда степень рассматривается как временный этап

перед трудоустройством. В аспирантуре ключевой проблемой становится конфликт между длительной научной подготовкой и динамичным рынком труда, особенно в IT-сфере, где многие прерывают обучение ради коммерческих предложений.

Концептуальные основания сохранности контингента

Динамика контингента формируется под влиянием трех взаимосвязанных факторов: личной мотивации студентов, институциональной образовательной среды и макросоциального контекста.

Дифференцированный подход показывает эффективность: для бакалавриата - ранняя диагностика и адаптационные программы (снижение отсева на 25-30% [3]), для магистратуры - проектная интеграция с производством (18-22% [3]), для аспирантуры - научные коллаборации (15-17% [3]).

Институциональные механизмы управления

Современные методы управления основаны на предиктивной аналитике и персонализированных траекториях. Машинное обучение позволяет выявлять группы риска за 4-6 месяцев до возможного отчисления, анализируя цифровые следы. Снижение активности на 20%[4] - более значимый индикатор, чем абсолютная успеваемость.

Ключевые аспекты управления включают:

- Самоэффективность благодаря раннему выявлению трудностей;
- Создание чувства принадлежности с помощью академических сообществ;
- Обеспечение релевантности образования через практико-ориентированные методы.

Интеграция с практикой

Адаптивные образовательные экосистемы, сочетающие формальные и неформальные компоненты, демонстрируют особую эффективность. Интеграция компенсаторных модулей в базовый учебный план для технических дисциплин снижает неуспеваемость на 35-40%[2]. Критически важным является не содержание дополнительных занятий, а их органичное включение в образовательный процесс через блочно-модульную систему.

Методология оценки эффективности

Интегральная модель оценки сохранности контингента основывается на взаимодействии четырех ключевых индикаторов:

- $\mathbf{K_1}$ (Завершение цикла) - Институциональные обязательства

Отражает способность вуза создать условия для реализации образовательных целей студентов [5].

- $\mathbf{K_2}$ (Успеваемость) – Самоэффективность

Коррелирует с верой студентов в свои способности.

- Данные показывают: при росте самоэффективности на 1 балл по шкале Лайкерта [5] успеваемость повышается на 0.3 стандартных отклонения ($\beta=0.32$, $p<0.01$).

- $\mathbf{K_3}$ (Удовлетворенность) - Чувство принадлежности

Интегрирует социальную интеграцию как предиктор персистенции. Валидация на выборке 24,300 студентов подтвердила сильную корреляцию ($r=0.76$) между этим показателем и готовностью продолжать обучение.

- $\mathbf{K_4}$ (Трудоустройство) - Релевантность образования

Отражает реализацию принципа "perceived curriculum value". [6]

Формула интегрального индекса сохранности (ИСк)

$$\text{ИСк} = 0.4 \cdot K_1 + 0.3 \cdot K_2 + 0.2 \cdot K_3 + 0.1 \cdot K_4$$

$K_1 = \frac{\text{Nвыпуск}}{\text{Nприём}}$ (коэффициент завершения цикла)

$K_2 = \frac{1}{\text{T}}\sum_{\text{t=1}}^{\text{T}}$ (средняя успеваемость по семестрам)

$K_3 = \frac{1}{\text{Q}}\sum_{\text{p=1}}^{\text{Q}} R_{\text{q}}$ (индекс удовлетворённости, R_{q} – оценка по шкале Лайкерта)

$K_1 = \frac{\text{Nтрудоустр. по спец.}}{\text{Nвыпуск}}$ (доля трудоустроенных по специальности)

Весовые коэффициенты ИСк представлены на рисунке 1

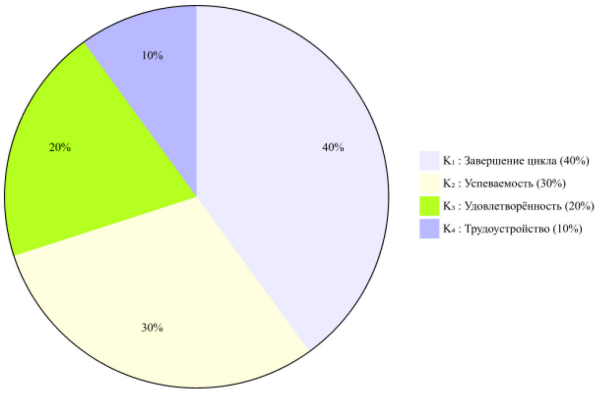


Рис. 1 – Весовые коэффициенты ИСк (Структуры интегрального индекса)

Регрессионный анализ весовых коэффициентов:

$$\beta_j = \arg\min_{\beta} \sum_{i=1}^{n} (\text{Отсев}_i - \sum_{j=1}^{4} \beta j K j, i)^2$$

Результаты валидации (n=24 300n=24300) представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты статистического анализа модели прогнозирования отсева.

Параметр	Значение	Интерпретация
R2	0.86	Объяснённая дисперсия
Стандартная ошибка	±0.02	Точность прогноза
Корреляция с отсевом	-0.89***	p<0.001

Формулы для компонентов индекса

Для K_2 (Самоэффективность → Успеваемость):

$$\Delta G = 0.3 \cdot \sigma \cdot \Delta \text{SE}$$

где:

- ΔG – изменение успеваемости (в стандартных отклонениях),
- ΔSE – рост самоэффективности (по шкале Лайкерта),
- σ – стандартное отклонение успеваемости в выборке.

Для K_3 (Чувство принадлежности → Готовность к продолжению обучения):

$$\text{P(персистенция)} = \frac{1}{1+e^{-(0.76*SB-0.18)}}$$

Где SB – индекс чувства принадлежности (0-10 баллов).

Модель представляет собой взвешенную сумму параметров, весовые коэффициенты которой определены экспертными оценками и подтверждены регрессионным анализом. Проверка на выборке 24 000 студентов из 12 вузов показала высокую точность прогноза (R^2=0.86, ошибка ±0.02).

Перспективы оптимизации

Ведущие технологические вузы выделяют три приоритета:

- Цифровые экосистемы с аналитикой и электронными портфолио
- Сетевое межвузовское взаимодействие
- Гибкие механизмы финансирования

Ключевая задача - разработка комплексных цифровых систем управления контингентом, интегрирующих эти компоненты.

Динамика движения контингента в РТУ МИРЭА: анализ потерь и меры сохранности

РТУ МИРЭА, как крупный технологический университет (свыше 26000 студентов, включая 1200 иностранцев), системно решает задачи сохранности контингента через сочетание академических, финансовых и социальных стратегий. Анализ динамики опирается на данные приёмной кампании 2024 г. [7], мониторинг эффективности вуза и институциональные отчеты [8].

Таблица 2 – Факторы потерь, сохранности и результаты удержания контингента в вузе

Раздел	Категория	Меры / Факторы	Детализация / Эффективность / Проблемы
Факторы потерь	Академическая адаптация	Низкие баллы ЕГЭ	• Направления с низкими баллами (напр., «Хим. технология природных энергоносителей», ср. балл 203- высокий риск отсева.)
	Финансы	Невозможность оплаты обучения	• Отчисления на платных программах.[9] • Усугубление ситуации в пандемию.
	Трудоустройство	Профессиональные предложения	• Магистры и аспиранты IT-направлений часто прерывают обучение.
Меры сохранности	Академическая поддержка	Дифференцированные траектории	• Входное тестирование, адаптивные учебные планы.
		Цифровая инфраструктура	• Лаборатории VR/AR, коллаборации с компаниями повышают вовлеченность. • Курсы «Цифровой кафедры» охватывают 45% студентов IT-институтов. [10]
	Финансовые механизмы	Гранты, стипендии, перевод на бюджет	• Платники с ЕГЭ ≥210 - гранты до 250 000 руб. Социальные выплаты. • Участники Специальной Военной Операции - стипендии, льготное общежитие.
	Социальная интеграция	Программы адаптации	• Психологическая помощь, в т.ч. молодых семьям.
		Внеучебная активность	• 150+ мероприятий в год (хакатоны, автопробеги ко Дню Победы и др.). • Волонтёрские проекты
Результаты	Эффективность	Гранты	• Направления с грантовой поддержкой (IT, робототехника): снижение оттока.

Заключение

Исследование подтверждает, что стабильность студенческого контингента требует системного подхода, учитывающего восприятие, мотивацию студентов и институциональные изменения. Ключевыми детерминантами успеха выступают самоэффективность, чувство принадлежности, релевантность учебного плана.

Опыт РТУ МИРЭА подтверждает эффективность комплексного подхода, сочетающего предиктивную аналитику, адресную финансовую поддержку и цифровизацию образовательного процесса. Дальнейшее совершенствование системы сохранности контингента требует:

1. Персонализации образовательных траекторий через гибкие учебные планы, адаптированные под индивидуальные карьерные устремления студентов.
2. Углубления партнерства с индустрией для создания устойчивых механизмов взаимодействия "вуз-бизнес", минимизирующих явление академического транзита.

Переход от локальных решений к системной трансформации образовательного процесса, учитывающей субъективные факторы студенческой мотивации, глобальные тренды и социальные аспекты, становится необходимым условием для обеспечения образовательного равенства и повышения конкурентоспособности университетов в долгосрочной перспективе.

Список литературы

1. Образование в России: 2024 : стат. сб. / Федеральная служба государ-ственной статистики. - Москва : Росстат, 2024. - 215 с.
2. Индикаторы образования : науч.-попул. интернет-изд. / Indicator.Ru. - URL: https://indicator.ru/humanitarian-science/indikatori-obrazovania.htm (дата обращения: 03.07.2025).
3. *Мамонтов В.В.* О сохранности контингента студентов и улучшении качества обучения в вузе // Международный научно-исследовательский журнал. - 2017. - № 7-1 (61). - С. 1-5. - URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-sohrannosti-kontingenta-studentov-i-uluchshenii-kachestva-obucheniya-v-vuze (дата обращения: 03.07.2025).
4. *Сидорова Е.Л., Петров В.К.* Академическая неуспеваемость как фактор оттока студентов // Вопросы образования. - 2024. - № 1. - С. 112-130.
5. Мониторинг эффективности образовательных организаций : офиц. сайт / Минобрнауки РФ. - 2023. - URL: https://monitoring.miccedu.ru (дата обращения: 10.06.2025).
6. *Tinto V.* Through the Eyes of Students // Journal of College Student Retention: Research, Theory & Practice. - 2015. - Vol. 19, no. 3. - P. 254-269. - DOI: 10.1177/1521025115621917.
7. *Hossler D., Shapiro D., Dundar A. et al.* Using Data Analytics to Improve Student Retention // Higher Education Policy. - 2019. - Vol. 32. - P. 421-439. - DOI: 10.1057/s41307-019-00145-1.
8. Сведения о ходе приема заявлений и документов, списки поступающих : офиц. сайт / МИРЭА - Российский технологический университет. Приемная комиссия. - URL: https://priem.mirea.ru/first-degree/selection/current (дата обращения: 03.07.2025).
9. Отчет о динамике контингента за 2024 год / РТУ МИРЭА. - Москва, 2025. - 34 с.
10. *Андрюхина И.В.* О сохранности контингента студентов и улучшении качества обучения в вузе // Научный журнал. - 2017. - № 7(61). - С. 1-8. - URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-sohrannosti-kontingenta-studentov-i-uluchshenii-kachestva-obucheniya-v-vuze (дата обращения: 03.07.2025).

2.3.1.

О.А. Кашинцева канд. техн. наук, А.В. Мясных

Череповецкий государственный университет,
институт информационных технологий, кафедра математики и информатики,
Череповец, oakashintceva@chsu.ru

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ МНОГОЗНАЧНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОПЕРАТИВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА И ЗАМЕНЫ КЛАССОВ

Использование многозначной классификации в интеллектуальных системах позволяет определять наличие нескольких классов на одном изображении, однако ее применение сопряжено с рядом проблем: 1) при добавлении или удалении нового класса в систему возникает необходимость правки всего набора данных; 2) при построении одной универсальной модели с большим количеством классов для решения задач разной тематики увеличивается стоимость и время реализации будущих проектов. В статье предлагается подход к построению системы для решения задачи многозначной классификации, не имеющий данных проблем. Описан прототип интеллектуальной системы для определения наличия средств индивидуальной защиты (СИЗ) на работниках предприятий, демонстрирующий эффективность метода.

Ключевые слова: *многозначная классификация, нейронные сети, интеллектуальная система, средства индивидуальной защиты.*

Введение.

Руководители предприятий заинтересованы в системе с искусственным интеллектом, которая бы отслеживала и пресекала случаи нарушения правил техники безопасности работниками: наличие на работниках СИЗ, например, каски, привязи и т.п., может сохранить им здоровье, а иногда и жизнь.

Одной из основных задач систем по обнаружению средств защиты на человеке является классификация изображений. Ее цель – определить к какому одному классу из заранее заданного набора принадлежит каждый элемент данных. Для случаев, когда объекты могут принадлежать одновременно к нескольким категориям, и применяется многозначная классификация, которая вместо определения единственного класса оценивает вероятность принадлежности объекта ко всем возможным классам. Однако данный подход сопровождается следующими сложностями в аннотировании данных: 1) для каждого элемента необходимо проставить метки для всех классов (это делает разметку сложнее по сравнению с другими типами задачи классификации, где нужно поставить только один класс); 2) классы могут зависеть друг от друга, или одни появляться чаще других, что усложняет их балансировку, так как нельзя рассмотреть каждый класс в отдельности и увеличить размер выборки только по необходимым классам; 3) при добавлении нового класса невозможно обучить модель без правки всего имеющегося набора данных.

Перечисленные проблемы могут быть критическими для компаний, которые предоставляют свои алгоритмы нескольким заказчикам для решения различных задач. Условия, в которых работает система, и требуемый набор классов могут варьироваться, что вынуждает создавать отдельные модели и отдельные наборы данных для каждого заказчика. Цена и время реализации проекта при таком подходе будет высокой из-за того, что необходимо каждый раз собирать новый разнообразный набор данных. Альтернативным подходом является построение одной универсальной модели многозначной классификации с большим количеством классов. Трудоёмкость проектов будет зависеть только от количества классов поставляемой системы, а не от сложности конкретных задач клиента. Это

увеличивает стоимость и время реализации будущих проектов. При добавлении или удалении нового класса в систему остается проблема правки всего набора данных. Тем не менее, если система предполагается к использованию в схожих условиях различных проектов, этот подход является основным.

Основная часть.

Цель исследования: разработать метод, позволяющий решать задачи многозначной классификации без потери точности или производительности, и прототип системы, демонстрирующий его эффективность.

Структуру нейронной сети для классификации можно условно разбить на несколько блоков. Первыми расположены слои извлечения признаков (тело), а в конце – слои классификации (голова). Одна голова «отвечает» за все классы и их не разделить друг от друга. За основу прототипа системы взята идея использования нескольких бинарных классификаторов, отвечающих каждый за свой класс, что позволило иметь для каждого класса свой независимый набор данных и облегчить балансировку и разметку данных. Для нивелирования снижения производительности с добавлением новых классов было использовано единое тело, извлекающее общие признаки, и несколько индивидуальных голов. В качестве тела использовался кодировщик из сверточного автокодировщика [1], переводящий изображение в вектор скрытого пространства, содержащий признаки, достаточно описывающие начальные данные, для их полного восстановления. Данный вектор передавался на вход бинарным классификаторам, отвечающим только за свой класс (см. рис. 1).

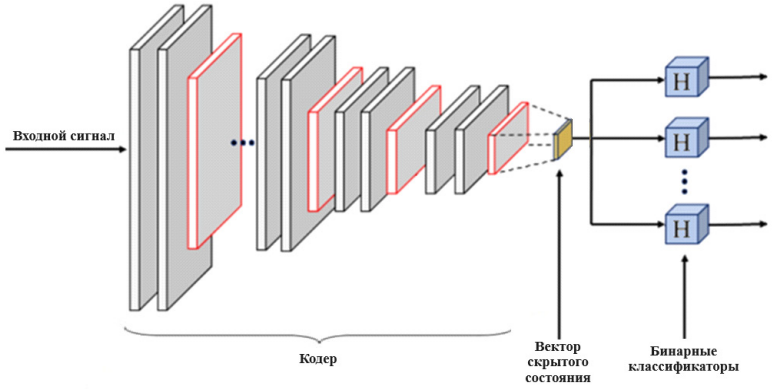


Рис. 1- Структура прототипа системы

Предложенная архитектура позволяет обучить тело и головы на независимых наборах данных. Использование единого тела способствует уменьшению количества обучаемых параметров и положительно влияет на производительность. А использование нескольких голов дает возможность добавлять новый класс без обязательного просмотра всего уже существующего набора данных.

Кодер основан на архитектуре efficietnnet_b0 [2], совмещающей в себе высокую точность и производительность. В своей структуре она имеет сверточные слои, субдискретизирующий слой AveragePool, функцию активации SiLU [3, 4], последний слой – выпрямление карт признаков для их преобразования в вектор скрытого состояния. Архитектура декодера схожа с кодером, но имеет одно важное отличие: вместо сверточных слоев используются транспонированные сверточные слои [5] для интерполяции карт признаков до исходного размера изображения. В отличие от обычных слоев интерполяции они имеют обучаемые параметры, что обеспечивает более точное увеличение разрешения. Слои, производящие бинарную классификацию в «головах» нейронной сети, представляют собой несколько подряд идущих полносвязных слоёв.

Для обучения автокодировщика в качестве функции потерь выбрана среднеквадратическая ошибка. Такой подход позволил нейронной сети формировать свой ответ, основываясь на каждом пикселе независимо. Для классификатора использовалась бинарная кросс-энтропия, так как выходом модели является вероятность принадлежности изображения к целевому классу, принимающая значения в интервале от нуля до единицы.

Создание набора данных. Для решения задачи обнаружения наличия СИЗ на сотрудниках были подготовлены выборочные данные, содержащие только изображения (обрезанные) людей с одного из предприятий города. Проведена разметка данных, в результате которой человеку на изображении была сопоставлена информация о местоположении его в кадре в разные моменты времени и наличии или отсутствии на нем СИЗ.

С помощью IP камеры были собраны два набора данных: «исходный» и «добавочный». «Исходный» содержал изображения людей с надетыми СИЗ: каской, медицинской маской, светоотражающим жилетом. «Добавочный» – с надетой на человека страховочной привязью, дополнительным СИЗ, которого нет в «исходном» наборе данных. Данные обоих наборов были разбиты на три подмножества в соотношении 10:30:60 для валидации, тестирования и тренировки соответственно. Всего для обучения модели было собрано для «исходного» и «добавочного» наборов соответственно 15000 и 2000 кадров, для оценки эффективности и тестирования – 1500 и 500.

В отличие от задачи многозначной классификации, где аннотации описаны в одном csv файле, для прототипа интеллектуальной системы был выбран формат описания классов и подмножества с помощью строгой структуры папок. Такой подход позволил иметь наборы данных для каждой головы классификатора в отдельной обособленной папке, что обеспечило легкую манипуляцию их количеством. Для этого был реализован скрипт на языке Python. Он формирует папки для каждого этапа обучения под названиями Features, HardHat, SafetyHarness, SafetyVest, SurgicalMask, что соответствует наборам данных для обучения кодировщика, классификации наличия каски, страховочной привязи, светоотражающего жилета и медицинской маски соответственно. Каждая папка внутри разбита на подмножества Train Test и Valid, которые, в свою очередь, разбиты на подклассы: True, содержащем изображения с наличием необходимого класса, и False – с его отсутствием (кроме автокодирощика).

Обучение прототипа проходило в два этапа: 1) обучение автокодировщика, 2) обучение по одному бинарному классификатору на каждый класс. Для проведения тестирования было произведено обучение трех возможных вариантов:

1) Многозначный классификатор на «исходном» наборе данных на четыре класса, который был дополнен «добавочным» набором данных с новым СИЗ. Обучение происходило на архитектуре кодера с одной «головой», рассчитанной не на один выход, а на четыре, имитируя ситуацию использования одной универсальной модели для всех классов. Функция потерь использовалась так же, что и в прототипе.

2) Прототип системы на «исходном» наборе данных, в который были добавлены метки только для нового класса «страховочная привязь» из «добавочного» набора данных. Тренировка кодировщика производилась первой, так как его выходные значения необходимы для обучения классификаторов. Изображение проходило через заранее обученные веса кодировщика, полученный результат передавался на вход классификатору для его обучения.

3) Прототип системы на «исходном» наборе данных, в который были добавлены метки всех классов из «добавочного» набора данных. Это позволило сравнять количество меток у многозначного классификатора и прототипа, а обучение проходило так же, как и было описано выше.

Тестирование прототипа. Для оценки эффективности прототипа использовались метрики Precision, Recall и F1-score. Оценка точности классификации по всем классам проводилась на «исходном» валидационном наборе данных (см. таблицу 1), а только нового класса – на «добавочном» валидационном наборе (см. таблицу 2).

Для определения скорости работы системы было произведено тестирование производительности на графическом процессоре GTX 1080 с точностью fp32. В результате время обработки 1 кадра многозначным классификатором составило 2.76 мс., прототипом – 2.86 мс.

Таблица 1- Результаты оценки точности прототипа на «исходном» валидационном наборе данных, усреднённых по всем классам

Метрики / Вариант обучения	Precision	Recall	F1-score
Многозначный классификатор	0.76	0.72	0.74
Прототип с добавлением только нового класса	0.79	0.76	0.77
Прототип с полным набором данных	0.83	0.85	0.84

Таблица 2- Результаты оценки точности классификации добавленного класса на «добавочном» валидационном наборе данных

Метрики / Вариант обучения	Precision	Recall	F1-score
Многозначный классификатор	0.75	0.63	0.72
Прототип с добавлением только нового класса	0.98	0.95	0.96
Прототип с полным набором данных	0.98	0.95	0.96

Тестирование показало, что качество прототипа сопоставимо с многозначным классификатором даже при добавлении экземпляров только нового класса, а скорость обработки при этом увеличивается на 3.5%. При таком подходе для добавления в набор данных 2000 изображений, содержащих четыре класса, количество проставляемых меток упадет на 91% (см. рис. 2), что увеличит скорость разметки.

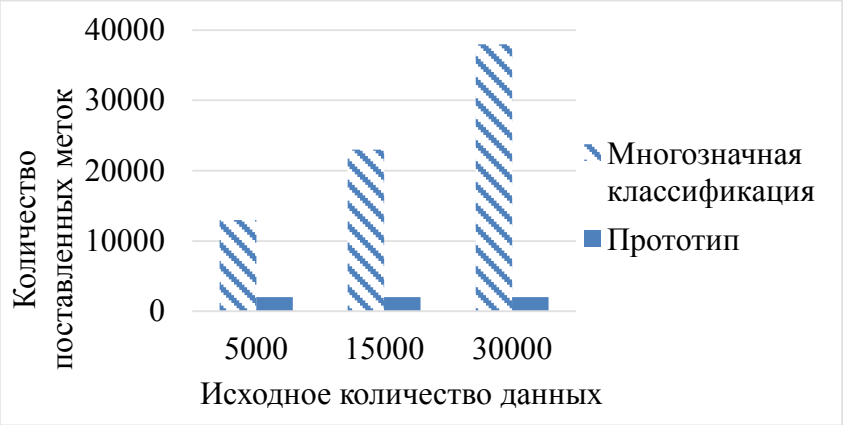


Рис. 2 - Количество поставленных меток при добавлении 2000 изображений в различные объемы исходных наборов данных для классификации на 4 класса

Заключение и выводы.

В ходе проведённого тестирования было установлено, что прототип интеллектуальной системы демонстрирует уровень качества, сопоставимый с многозначным классификатором. Рассмотрение каждого класса независимо друг от друга позволило балансировать количество их экземпляров по отдельности, добавлять новые классы путем разметки только целевых данных, минимизировать рост вычислительных затрат при масштабировании системы. Это обеспечивает значительную экономию временных и финансовых затрат при разработке подобной интеллектуальной системы.

Список литературы

1. *Hinton G.E., Salakhutdinov R.R.* Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks // Science. — 2006-07-28. — Vol. 313, iss. 5786. — P. 504–507. — ISSN 1095-9203 0036-8075, 1095-9203. — doi:10.1126/science.1127647

2. AutoEncoder using the EfficientNet by xingyaoww · Pull Request #257 · lukemelas/EfficientNet-PyTorch · GitHub [Электронный ресурс] // GitHub URL: https://github.com/lukemelas/EfficientNet-PyTorch/pull/257 (дата обращения: 11.05.2025).

3. *Stefan E., Eiji U., Kenji D.* Sigmoid-Weighted Linear Units for Neural Network Function Approximation in Reinforcement Learning [Электронный ресурс] // arXiv URL: https://arxiv.org/abs/1702.03118 (дата обращения: 05.05.2025).

4. *Dan H., Kevin G.* Gaussian Error Linear Units (GELUs) [Электронный ресурс] // arXiv URL: https://arxiv.org/abs/1606.08415 (дата обращения: 05.05.2025).

5. *Matthew D. Z., Dilip K., Graham W. T., Rob F.* Deconvolutional Networks [Электронный ресурс] // Matthew Zeiler URL: https://www.matthewzeiler.com/mattzeiler/deconvolutionalnetworks.pdf (дата обращения: 05.05.2025).

2.3.1.

А.В. Кожина, Д.Р. Новиков, К.Е. Долженко, В.Д. Хашин

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева»,
Институт информатики и телекоммуникаций,
кафедра системного анализа и исследования операций,
Красноярск, kojinaanas@gmail.com

ИНТЕГРАЦИЯ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ЮРИДИЧЕСКИЕ ЧАТ-БОТЫ: ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ

В статье рассматривается задача интеграции больших языковых моделей в человеко-машинные интерфейсы для юридического консультирования. Исследованы методы параметр-эффективного дообучения моделей с применением технологий QLoRA. Представлены результаты сравнительного анализа моделей LLaMA-3.1-8B-Instruct и Qwen-2.5-14B-Instruct, обученных на корпусе юридических вопросов. Произведена интеграция лучшей модели в Telegram-бота.

Ключевые слова: *большие языковые модели, интеллектуальные агенты, QLoRA, юридический чат-бот, дообучение, человеко-машинный интерфейс.*

Развитие технологий машинного обучения привело к появлению моделей, способных генерировать тексты, вести диалог и решать сложные задачи обработки естественного языка. Важной проблемой остаётся адаптация таких моделей к узкоспециализированным областям, таким как юриспруденция. Интеллектуальные агенты, основанные на больших языковых моделях, могут значительно повысить доступность правовой помощи, но требуют тонкой настройки и интерпретируемости.

Целью данного исследования является анализ и реализация интеллектуального агента на основе дообученной большой языковой модели для обработки юридических вопросов, включая исследование методов дообучения таких моделей, сбор и подготовку специализированного юридического корпуса, реализацию дообучения моделей LLaMA и Qwen, проведение сравнительного анализа качества их генерации, а также создание Telegram-бота для пользовательского взаимодействия с моделью.

Интеллектуальный агент — это автоматизированная система, использующая модели искусственного интеллекта для взаимодействия с окружающей средой с целью достижения заданных целей. В своей работе интеллектуальный агент сочетает рассуждения, планирование и выполнение действий. Агент обладает следующими свойствами: реактивность, проактивность, социальность. В зависимости от задач и среды функционирования можно выбирать наиболее подходящий тип агента или создавать гибридные системы [2].

Большие языковые модели − это тип нейронных сетей, которые могут создавать текст, понимать контекст и отвечать на вопросы. Архитектура трансформеров обеспечивает параллельную обработку данных, что существенно ускоряет обучение и повышает эффективность моделей. Трансформеры кардинально изменили методы решения задач, связанных с последовательностями данных [3].

Дообучение больших языковых моделей представляет собой метод обучения уже существующих моделей на специализированных наборах данных меньшего объема. Метод LoRA требует меньше вычислительных ресурсов по сравнению с полным переобучением. Вместо изменения всех параметров данный подход добавляет лишь небольшие обучаемые матрицы. Метод QLoRA объединяет преимущества низкоранговой адаптации с 4-битной квантизацией весов [4]. Это позволяет обучать модели с миллиардами параметров даже на GPU с ограниченным объемом памяти.

Формирование набора данных является фундаментальным компонентом процесса разработки и последующего обучения модели. В качестве предметной области были выбраны юридические вопросы и ответы, публикуемые на платформе Pravoved.ru. На следующем этапе данные проходили этап очистки: удалялись дублирующиеся записи, HTML-теги, нерелевантные фрагменты, не несущие смысловой нагрузки.

Платформа Hugging Face использовалась для получения доступа к моделям Llama-3.1-8B-Instruct и Qwen-2.5-14B-Instruct. Реализация дообучения осуществлялась с помощью библиотеки Unsloth и метода QLoRA. Настройка гиперпараметров включала значения rank и alpha адаптации. Для обучения использовался модуль SFTTrainer, что позволило контролировать параметры обучения, включая размер батча, количество итераций, тип оптимизатора и шаги градиентного накопления.

Дообучение производилось в среде Google Colab с использованием графического ускорителя NVIDIA T4. Ограничения платформы, такие как объём видеопамяти и ограниченное время сессии, компенсировались применением метода QLoRA и эффективной конфигурацией гиперпараметров.

Для оценки результатов был проведён сравнительный анализ предобученных и дообученных моделей на юридических вопросах. Модель Qwen-2.5-14B-Instruct продемонстрировала более высокую точность и структурированность ответов. При этом модель LLaMA-3.1-8B-Instruct показала наличие галлюцинаций и терминологических неточностей, несмотря на расширенное дообучение с различными конфигурациями LoRA. В целях количественной оценки влияния этих конфигураций на вычислительные затраты и параметры обучения в таблице 1 представлены соответствующие характеристики модели LLaMA-3.1-8B-Instruct.

Таблица 1 – Сравнение различных конфигураций на потребление ресурсов LLaMA-3.1-8B-Instruct

Параметры	**Кол-во обучаемых параметров**	**Время (мин)**	**VRAM peak**	**VRAM (train)**	**% VRAM (train)**
r=8, α=8, step = 127	20.9M	24.08	7.71 GB	0.58 GB	3.92%
r=16, α=16, step = 127	41.9M	27.31	7.91 GB	0.78 GB	5.31%
r=32, α=32, step = 127	83.9M	24.92	8.31 GB	1.18 GB	8.01%
r=64, α=64, step = 127	167.8M	26.86	9.11 GB	1.97 GB	13.40%
r=128, α=128, step = 127	335.5M	26.97	10.80 GB	3.66 GB	24.87%

Сравнение различных конфигураций на потребление ресурсов Qwen-2.5-14B-Instruct представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение различных конфигураций на потребление ресурсов *Qwen-2.5-14B-Instruct*

Параметры	**Кол-во обучаемых параметров**	**Время (мин)**	**VRAM peak**	**VRAM (train)**	**% VRAM (train)**
r=8, α=8, step = 30	20.9M	13.38	12.803 GB	0.762 GB	5.169%
r=16, α=16, step = 30	41.9M	13	13.08 GB	1.182 GB	8.018%
r=32, α=32, step = 30	83.9M	13.55	13.904 GB	1.863 GB	12.638%

Для количественного анализа использовались метрики BERTScore, METEOR, BLEU, а также вероятности логических отношений по данным Natural Language Inference. Модель Qwen-2.5-14B-Instruct показала рост метрик с увеличением значений rank и alpha, что свидетельствует о повышении качества генерации.

На завершающем этапе была реализована интеграция дообученной модели в Telegram-бота. Telegram-бот принимает пользовательский юридический вопрос, передаёт его модели и возвращает сгенерированный ответ.

Модель Qwen-2.5-14B-Instruct, дообученная методом QLoRA, обладает потенциалом к практическому применению в сфере юридического консультирования. Несмотря на аппаратные ограничения, результаты демонстрируют неплохое качество ответов и логическую последовательность.

Разработанная система может быть применена в других предметных областях, требующих юридической экспертизы и автоматизации взаимодействия с пользователем. Выводы подтверждают целесообразность использования подхода QLoRA в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Список литературы

1. *Красильников Б.А., Евстифеев А.А., Николаев Д.Б.* Разработка предложений по устанени. Недостатков программного обеспечения с открытым исходным кодом для регистрации вводимой в автоматизированную систему информации – Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 4. С. 307-314;

2. *Полякова А.С., Бежитский С.С., Бежитская Е.А., Липинский Л.В.* Оптимизация мешка слов эволюционным методом в составе конвейера для задачи извлечения и классификации информации из текста – Перспективы науки. 2023. № 12 (171). С. 41-45.

3. *Zhang L., Hu Yu., Li W., Bai Q., Nand P.* LLM-AIDSIM: LLM-enhanced agent-based influence diffusion simulation in social networks – Systems. 2025. Т. 13. № 1. С. 29.

4. *Добровольский Д.С., Олейников В.С., Рац Е.С.* Разработка интеллектуальной системы для автоматического ответа на отзывы покупателей на маркетплейсах с применением LLM – Научный результат. Информационные технологии. 2024. Т. 9. № 4. С. 74-84.

2.3.1.

В.Р. Козлов, А.В. Кожина, Д.Р. Новиков, К.Е. Долженко, В.Д. Хашин

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»,
Институт информатики и телекоммуникаций,
кафедра системного анализа и исследования операций,
Красноярск, kozlovvr10@gmail.com

ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫЕ РЕШЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

В работе исследованы интерпретируемые способы обнаружения аномалий в чувствительных данных. Рассмотрены два подхода: применение дерева решений и комбинация случайного леса с методом LIME. Эксперименты выполнены на реальных данных ЭКГ и транзакций по кредитным картам. Подходы показали высокую эффективность и возможность объяснения результатов для работы с чувствительными данными.

Ключевые слова: *чувствительные данные, дерево решений, случайный лес, LIME, интерпретация решений.*

Введение

В последние годы методы машинного обучения и искусственного интеллекта применяются повсеместно. Многие из них, такие как нейронные сети и ансамблевые модели, представляют собой трудно интерпретируемые «черные ящики» [1]. В задачах с чувствительными данными – например, в медицине или финансах – важна их прозрачность, поскольку ошибки могут привести к серьезным последствиям.

Анализ данных требует внимательной обработки выбросов и аномалий. Выбросы часто являются шумом и ухудшают качество моделей, тогда как некоторые отклонения могут нести важную информацию о критических изменениях в системе.

Цель исследования

Учитывая различия в подходах к обнаружению аномалий и выбросов, а также сложность выявления первых с помощью традиционных статистических методов, возникает необходимость применения более эффективных и автоматизированных решений. В данной работе рассмотрены два подхода к анализу данных, содержащих аномалии: Деревья решений и LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations).

Целью исследования является анализ двух подходов к интерпретации моделей машинного обучения: использования изначально интерпретируемых моделей (деревьев решений) и метода LIME для объяснения предсказаний сложных моделей. Для этого необходимо произвести оценку применимости указанных подходов при анализе данных с аномалиями, включая их способность обеспечивать точную и понятную интерпретацию результатов.

Обзор методов

Моделью, объединяющей в себе возможность интерпретации и возможность нахождения аномалий, является дерево решений. Дерево решений – алгоритм машинного обучения, строящий иерархическую структуру вида «ЕСЛИ <УСЛОВИЕ>, ТО <РЕШЕНИЕ>, ИНАЧЕ <РЕШЕНИЕ>». Используя такие структуры, можно разделять данные на подгруппы. Так данные можно разделить на условные две подгруппы – аномальные и нормальные. В данной статье рассматривается подход для решения задач, в которых уже есть представление о протекании процесса в нормальном и аномальном виде.

Второй подход – сочетание алгоритма случайного леса [2], обладающего высокой устойчивостью к переобучению, с методом LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations), предназначенным для обеспечения интерпретируемости результатов. Для анализа решающих правил модели применён метод LIME [3], позволяющий выявить вклад

отдельных признаков в прогноз модели на уровне конкретных экземпляров данных. Подход обеспечивает локальную прозрачность решений и способствует лучшему пониманию внутренней логики функционирования сложных моделей машинного обучения.

Медицинская диагностика

Рассмотрена задача обнаружения аномалий в данных электрокардиограмм (далее ЭКГ) – метода графической регистрации электрической активности сердца, отражаемой на поверхности тела. Известны образцы ЭКГ, относящиеся как к нормальному, так и к аномальному типу. Данная задача решается с применением модели дерева решений.

Пример элемента выборки изображён на рис. 1. По вертикальной оси отложены значения напряжения, по горизонтальной – порядковые номера отсчётов.

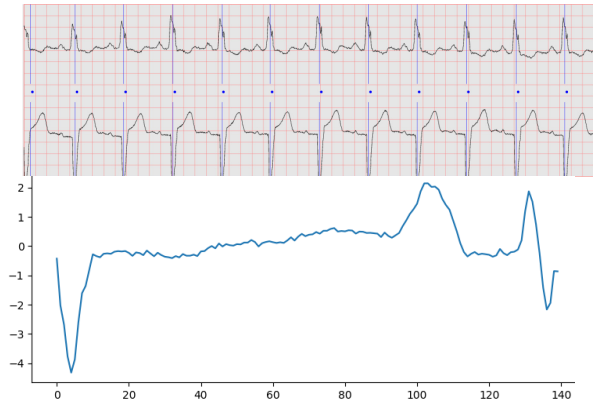


Рис. 1 – Сердцебиения до и после преобразования

Обработка данных проводилась в два этапа: сначала было выделено каждое отдельное сердцебиение, затем все выделенные фрагменты были нормализованы по длине. В результате был получен временной ряд, состоящий из 140 отсчётов напряжения, соответствующий интервалу длительностью около 0,8 секунды.

Ключевым направлением исследования является интерпретация полученных результатов. Для достижения этой цели были выполнены преобразования исходных данных, заключающиеся в усреднении значений напряжения на каждом интервале из 10 единиц. В результате применения модели достигнута точность классификации, равная 0,98. Кроме того, сформировано дерево решений, представляющее совокупность правил для определения аномалий, на котором отражены условия, позволяющие отнести объект выборки к классу аномальных или нормальных.

Получившееся дерево решений представлено на рис. 2.

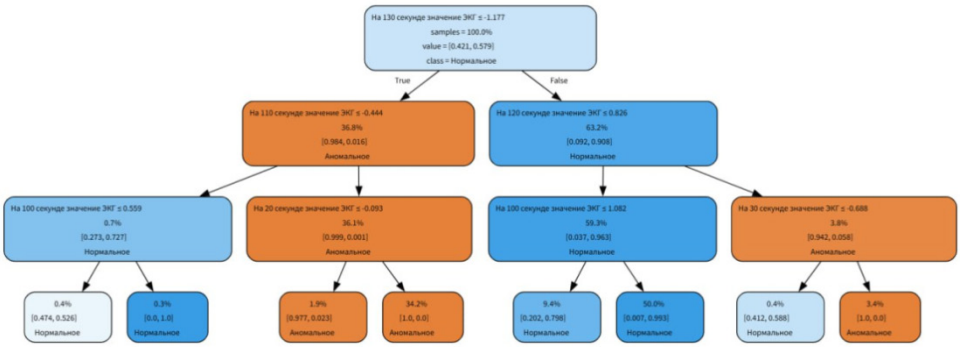


Рис. 2 – Дерево решений

Анализ дерева решений показывает, что значительная часть разбиения данных объясняется всего двумя-тремя правилами. Полученная структура обеспечивает высокую читаемость и позволяет эксперту легко интерпретировать логику принятия решений моделью.

Поиск мошеннических транзакций

Набор данных, используемый для тестирования алгоритма, состоит из транзакций по кредитным картам за сентябрь 2013 года. Общее количество транзакций составляет 284 807,

из которых 492 отнесены к категории мошеннических. Признаки были сформированы с применением метода главных компонент (PCA), что обеспечило сохранение конфиденциальности исходной информации, но одновременно затруднило их непосредственную интерпретацию.

На рисунке 3 представлена визуализация первых трёх признаков, полученных в результате преобразования.

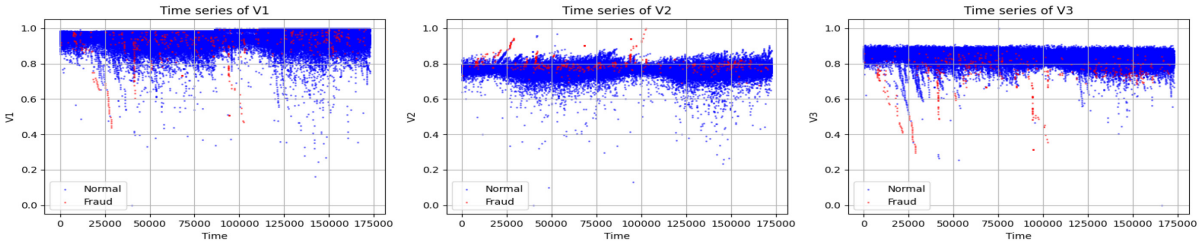


Рис. 3 – Визуализация некоторых признаков набора данных

Каждый график отражает распределение значений соответствующего признака для двух классов: легитимных транзакций (обозначены синим цветом) и мошеннических операций (выделены красным цветом). Визуальный анализ позволяет наблюдать различия в распределениях между указанными классами, что может свидетельствовать о наличии информативных признаков для задачи обнаружения аномалий.

В данной задаче присутствует сильный дисбаланс классов. Для балансировки был использован метод SMOTE. После обучения случайного леса достигнута точность определения легитимных транзакций 1.0, а мошеннических 0.82. По результатам работы получено описание влияния признаков объектов на присвоение им метки. Пример LIME-объяснения представлен на рисунке 4.

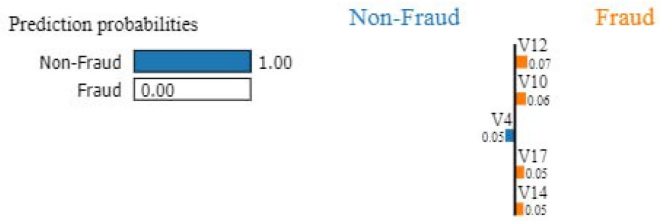


Рис. 4 – Визуализация некоторых признаков набора данных

Из рисунка можно увидеть, на какие признаки необходимо обратить внимание при принятии решения.

Заключение

Результаты экспериментов подтверждают эффективность комбинации случайного леса и метода LIME для обнаружения аномалий в конфиденциальных данных. Подход обеспечивает высокую точность и интерпретируемость решений, что критично в ответственных областях.

Исследована модель дерева решений, показавшая хорошую точность. Однако её применение потребовало предварительной обработки данных с использованием эвристических допущений.

Список литературы

1. *Карандеев Д.Ю., Баженов Р.И.* Применение методов глубокого обучения для оптимизации распределительных сетей с учётом критерия структурной надёжности – Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 2. С. 68-70.

2. *Панфилов И.А., Енин Н.С., Попов А.М.* Интеллектуальная система классификации текстовых сообщений – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024665198, 27.06.2024. Заявка № 2024663258 от 11.06.2024.

3. *Ribeiro M.T. et al.* "Why Should I Trust You?" Explaining the Predictions of Any Classifier // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2016. P. 1135-1144.

2.3.1.

В.Р. Козлов, А.В. Кожина, Д.Р. Новиков, В.Д. Хашин

[1]ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева»,
Институт информатики и телекоммуникаций,
кафедра системного анализа и исследования операций,
Красноярск, kozlovvr10@gmail.com

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОБУЧЕНИЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В работе рассматривается обучение искусственной нейронной сети эволюционным алгоритмом – дифференциальной эволюцией. Проводится сравнительный анализ дифференциальной эволюции и традиционного метода стохастического градиентного спуска. Анализ осуществляется на синтетических и реальных задачах машинного обучения с учителем.

Ключевые слова: *искусственные нейронные сети, стохастический градиентный спуск, дифференциальная эволюция, машинное обучение с учителем.*

Введение

Человечество всю свою историю сталкивается с необходимостью оптимизации совей деятельности. Сделать так, чтобы при минимальных затратах получить как можно больше продуктов. В системном анализе задача оптимизации сводится к поиску минимума или максимума. В современном мире широко используются методы многомерного статистического анализа (например, анализ главных компонент – PCA, метод частичных наименьших квадратов – PLS) и различные алгоритмы машинного обучения (нейронные сети, машины опорных векторов, деревья решений и др.) [1]. Применение этих подходов связано с решением сложных задач оптимизации, где традиционные оптимизационные подходы не всегда эффективны, и требуется разработка новых подходов.

Цель исследования

Целью данного исследования является сравнительный анализ двух подходов к обучению искусственных нейронных сетей – алгоритма дифференциальной эволюции (далее ДЭ) и классического метода стохастического градиентного спуска (Stochastic gradient descent**,** далее SGD). Оба метода предназначены для настройки весовых коэффициентов сети с целью минимизации функции потерь, однако они принципиально различаются по способу поиска оптимальных параметров.

Результаты исследования могут быть полезны при выборе стратегии обучения нейросетей в условиях ограниченных вычислительных ресурсов или сложных, не выпуклых пространствах ошибок.

Обзор методов

SGD – метод оптимизации, построенный на использовании градиентов. Суть метода заключается в пошаговом приближении к минимуму функции среднеквадратичной ошибки. Сначала назначаются случайным образом значения весов модели, затем вычисляются градиенты для каждого веса модели. Значения весов изменяются в направлении антиградиента – вычисляется среднее значение ошибки на всей выборке [2].

Однако, как и любой другой метод оптимизации, SGD может столкнуться с проблемой сходимости к локальному минимуму вместо глобального минимума. Эволюционные алгоритмы призваны решить эту проблему.

В эволюционных алгоритмах дифференциальная эволюция (далее ДЭ) –алгоритм глобальной оптимизации для непрерывных функций, в котором новые решения

формируются на основе разностей между случайно выбранными векторами популяции [3]. Схема работы алгоритма ДЭ представлена на рисунке 1.

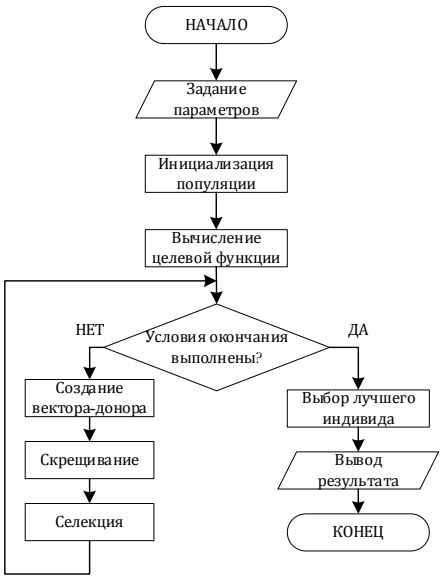


Рис. 1 – Алгоритм дифференциальной эволюции

Постановка задачи

Оптимизация – задача нахождения экстремума (минимума или максимума) целевой функции в некоторой области конечномерного векторного пространства. Тройка (f, X, extr) задаёт оптимизационную задачу (1).

$$f(x) \to \underset{x \in X}{extr} \quad (1)$$

Моделью машинного обучения, рассматриваемой в данной работе, является искусственная нейронная сеть (далее ИНС). Обучение ИНС связано с подбором весов, весов смещения и функций активации. Задача подбора весов и смещения для получения наилучших результатов модели формулируется как задача оптимизации.

В работе при решении задач регрессии для оценки модели используется среднеквадратическая ошибка, а для задач классификации взвешенная F1-score, в которой веса отражают соотношения количеств объектов разных классов. Однако для обучения самой же ИНС в задачах классификации используется перекрёстная энтропия.

Сравнительный анализ

В работе рассматриваются по три синтетических набора данных и по два реальных на каждую из задач.

Для каждого алгоритма выполнено по 100 независимых запусков (прогонов) на каждом наборе данных. Для обучения алгоритмов отведено равное количество вычислений целевой функции. Параметры алгоритмов, такие как сила и вероятность мутации, коэффициент обучения подобраны исходя из минимума ошибки. Размер популяции в ДЭ принят 30.

Синтетические наборы данных включают задачи регрессии (далее Р1, Р2, Р3) и наборы данных классификации (далее К1, К2, К3).

Оценка различия результатов производилась с помощью критерия Колмогорова-Смирнова с уровнем значимости 0.05. Результаты для задач представлены в таблице.

Таблица 1 – Результаты прогонов на учебных данных

№ набора данных	Алгоритм	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Есть ли статистически значимое различие?
Р1	ДЭ	0.350835	0.357087	0.043017	Да
	SGD	0.441185	0.440928	0.005786	
Р2	ДЭ	0.013509	0.012929	0.003846	Да
	SGD	0.02431	0.023523	0.003204	
Р3	ДЭ	0.090798	0.097455	0.023647	Да
	SGD	0.112775	0.112937	0.003509	
К1	ДЭ	0.688325	0.71311	0.160161	Да
	SGD	0.837474	0.840745	0.070681	
К2	ДЭ	0.75253	0.75194	0.00308	Да
	SGD	0.75738	0.7528	0.0174	
К3	ДЭ	0.80133	0.80652	0.03515	Да
	SGD	0.50177	0.50193	0.01199	

Следующим этапом исследования является сравнительный анализ алгоритмов на специализированных наборах данных.

Набор данных «Synthetic Health Data» предназначен для тестирования методов регрессионного анализа в здравоохранении, моделируя влияние медицинских и социально-экономических факторов на затраты на лечение. На этом наборе ДЭ показал медианное значение ошибки 18.6. Критерий Колмогорова-Смирнова не нашёл различие в выборках с p-value = 0.79.

Набор данных «Energy Efficiency» предназначен для прогнозирования нагрузки на отопление в зависимости от восьми различных архитектурных и конструктивных характеристик здания.

На этом наборе данных медианное значение ошибки SGD составило 6,32; медианное значение ошибки ДЭ составило 6.24. Критерий Колмогорова-Смирнова указал на наличие значимых различий в выборках с p-value = 0.003.

Набор данных «Breast Cancer Wisconsin (по данным Висконсинского университета)» был предоставлен 14 июля 1992 года и представляет собой оригинальную базу данных, собранную доктором Вольбергом на основе клинических случаев. Данные предназначены для решения задачи классификации и содержат информацию, позволяющую определить, является ли опухоль доброкачественной или злокачественной.

На данном наборе данных медианное значение критерия для обучения с помощью ДЭ составило 0.97. Критерий Колмогорова-Смирнова не показал статистически значимой разницы между алгоритмами.

Набор данных «Рис» (Cammeo и Osmancik)» был представлен 5 октября 2019 года. Он предназначен для решения задачи классификации и содержит информацию, полученную в результате анализа изображений зёрен двух сортов риса: Cammeo и Osmancik. Эти сорта являются основными видами сертифицированного риса, выращиваемого в Турции. Для каждого зерна были выделены морфологические признаки, на основе которых можно построить модель распознавания сорта.

На последнем наборе данных медианное значение ошибки SGD составило 0.98; медианное значение ошибки ДЭ составило 0.99. Критерий Колмогорова-Смирнова указал на наличие значимых различий в выборках с p-value = 0.002. Кроме того, стандартное отклонение ошибки при обучении с помощью ДЭ оказалось ниже на порядок.

Заключение

Подводя итоги, можно утверждать, что алгоритм ДЭ представляет собой эффективный инструмент для настройки параметров ИНС. В ходе проведённых экспериментов ДЭ в большинстве случаев продемонстрировал лучшие результаты по сравнению с SGD, как на

учебных, так и на реальных задачах машинного обучения.

Вместе с тем, в исследовании использовалась стандартная реализация алгоритма ДЭ без дополнительных модификаций. Для дальнейшего повышения его эффективности перспективным направлением является адаптация алгоритма под специфику задач.

Список литературы

1. *Камалов А.Б., Кондратов Д.В., Ушакова О.В.* Мониторинг и диагностика неисправностей в сложных технических системах на основе модели: расширенный анализ, Научно-технический вестник Поволжья №5 2025, С. 34-39.
2. Основы машинного обучения: учебное пособие / О.В. Лимановская, Т.И. Алферьева; Мин-во науки и высш. образования РФ – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. С. 16;
3. *Das S., & Suganthan P.N.* Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art. IEEE transactions on evolutionary computation, vol. 15, no. 1, 2011, С. 1;

2.3.1.

В.Р. Козлов, Е.А. Сопов

[1]ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»,
Институт информатики и телекоммуникаций,
кафедра системного анализа и исследования операций,
Красноярск, kozlovvr10@gmail.com

СИНТЕЗ КОЛЛЕКТИВОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

В данной работе рассматривается синтез ансамблей искусственных нейронных сетей различной архитектуры. Выполнен сравнительный анализ двух подходов к построению моделей: дифференциальной эволюции и использования разных видов коллективов нейронных сетей. Оценка эффективности проведена на синтетических и реальных задачах машинного обучения с учителем.

Ключевые слова: *искусственные нейронные сети, дифференциальная эволюция, машинное обучение с учителем, мультимодальность, ансамбли.*

Введение

В современном мире сфера применения машинного обучения или, как его ещё называют одного из крупнейших искусственного интеллекта, расширяется с каждым годом. Вместе с экспансией в различные сферы нашей жизни происходит постепенное улучшение самих алгоритмов – как самих моделей, так и способов их обучения. Самым популярным и известной моделью машинного обучения являются искусственные нейронные сети (далее ИНС) [1]. В тоже время существует проблема выбора архитектур ИНС и их обучения. В работе представлены различные способы обучения искусственных нейронных сетей.

Цель исследования

Совершенствовать результаты работы машинного обучения можно по-разному: изобретать новые модели, улучшать алгоритмы оптимизации либо использовать несколько моделей в коллективе. Последнее является актуальным направлением принятия решений. Как люди берут информацию из разных источников, приглашают разных экспертов, вводят методики для их лучшего использования, так и в данной работе используется идея объединения нескольких экспертов – моделей для получения результатов лучше, чем если бы модель была одна.

Результаты исследования могут помочь в выборе эффективных стратегий обучения моделей при ограниченных ресурсах и сложных пространствах ошибок.

Модификация алгоритма дифференциальной эволюции

Алгоритм дифференциальной эволюции (ДЭ) предназначен для поиска глобальных оптимумов [2]. Для расширения его возможностей предложено использовать начальную кластеризацию популяции, основанную на предположении о наличии «точек притяжения» вокруг оптимумов. Размер популяции увеличивают пропорционально ожидаемому числу экстремумов. Выделенные кластеры далее оптимизируются отдельно с помощью ДЭ для уточнения локальных и глобальных решений.

Ансамблирование в задачах с учителем

В задачах обучения с учителем поиск оптимальных параметров модели сводится к минимизации функции потерь. Сложный и мультимодальный характер целевой функции требует применения эффективных методов оптимизации, способных находить качественные решения в условиях множества локальных экстремумов.

Ансамбли – объединение частных результатов набора моделей с целью улучшения итогового решения [3]. Введём правило для объединения результатов моделей. При решении задачи регрессии использовано усреднение выходов модели.

При решении задачи классификации усреднять просто нечего: ведь выход модели – метка класса. С метками класса операция усреднения не определена. Однако в случае с нейросетями перед тем, как получить метку класса на выходе необходимо применить функцию softmax. Она преобразует выходы сырые выходы нейросети (логиты) в вероятности принадлежности объекта к классу. Затем к вероятностям принадлежности к классу применяется функция argmax, которая и определяет метку класса.

Впрочем, не обязательно сразу получать метки классов и проводить голосование. Это приводит к следующим проблемам: отсутствие весов для модели, спорные ситуации при одинаковом количестве голосов за разные классы.

Поэтому в данном случае применимо сначала суммировать вероятности на выходах всех модели и только затем применить функцию argmax.

Сравнительный анализ

В работе рассматриваются по три синтетических наборов данных и по два реальных на каждую из задач. Распределение данных для синтетических наборов данных представлено на рисунке 1. В первой строке представлены наборы данных регрессии (далее Р1, Р2, Р3), во второй строке наборы данных классификации (далее К1, К2, К3).

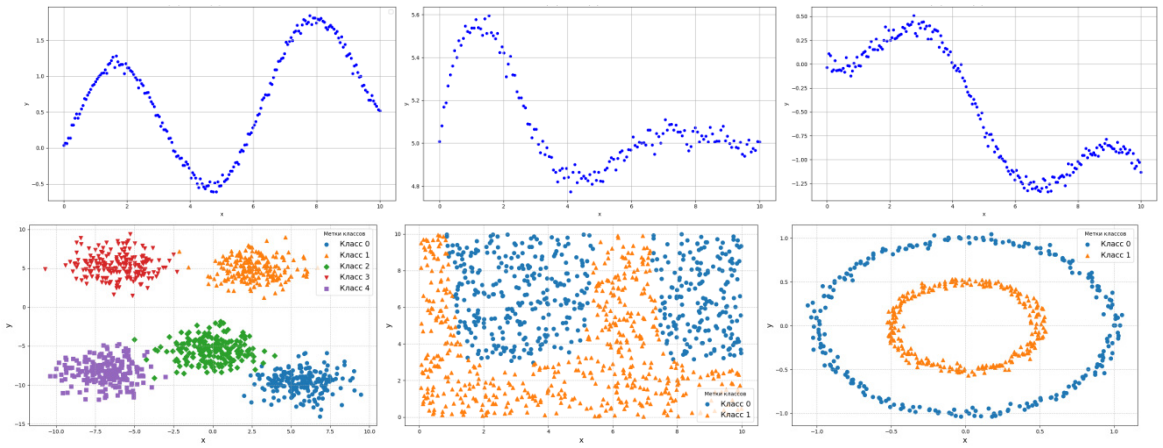


Рис. 1 – Распределение синтетических данных

Для каждого алгоритма выполнено по 100 независимых запусков (прогонов) на каждом наборе данных. Сравнивается эффективность четырёх способов построения моделей. Первый – обучение ИНС с помощью ДЭ, второй использование ансамбля (по две ИНС разной структуры), в котором ограничение на вычисление целевой функции сохраняется. Третий и четвёртый использование большого (больше ИНС в ансамбле, но ограничение на вычисления общее для всех) и сильного (каждую ИНС в ансамбле обучают за равное с ДЭ количество вычислений целевой функции).

Параметры алгоритмов ДЭ, такие как сила и вероятность мутации, количество вычислений целевой функции подобраны исходя из минимума ошибки.

Статистики по результатам прогонов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты прогонов на учебных данных

№ набора данных	Алгоритм	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение
Р1	Большой ансамбль	0.328692	0.331886	0.023521
	ДЭ	0.350835	0.357087	0.043017
	Ансамбль	0.328381	0.332603	0.026423
	Сильный ансамбль	0.269914	0.268475	0.03392
Р2	Большой ансамбль	0.016933	0.017046	0.002109
	ДЭ	0.013509	0.012929	0.003846
	Ансамбль	0.016544	0.016503	0.002039
	Сильный ансамбль	0.011156	0.01098	0.001745
Р3	Большой ансамбль	0.136549	0.135555	0.008573
	ДЭ	0.090798	0.097455	0.023647
	Ансамбль	0.080901	0.080592	0.00792
	Сильный ансамбль	0.040248	0.040654	0.008083
К1	Большой ансамбль	0.916018	0.927814	0.050258
	ДЭ	0.688325	0.71311	0.160161
	Ансамбль	0.816258	0.840952	0.11796
	Сильный ансамбль	0.969546	0.977763	0.02371
К2	Большой ансамбль	0.75477	0.75428	0.0021
	ДЭ	0.75253	0.75194	0.00308
	Ансамбль	0.75359	0.75408	0.00275
	Сильный ансамбль	0.75267	0.75194	0.00173
К3	Большой ансамбль	0.90129	0.88969	0.05696
	ДЭ	0.80133	0.80652	0.03515
	Ансамбль	0.88898	0.89239	0.05515
	Сильный ансамбль	0.89375	0.89899	0.04703

Из таблицы можно увидеть, что в большинстве случаев сильный ансамбль показывает себя лучше всех, однако в одном случае использование большого ансамбля может быть оправдано. Следующим этапом исследования является сравнительный анализ алгоритмов на специализированных наборах данных из репозитория UCI [4].

Набор данных «Synthetic Health Data» разработан для демонстрации и тестирования методов регрессионного анализа в сфере здравоохранения.

На этом наборе сильный ансамбль показал медианное значение ошибки 16,9. По критерий Колмогорова-Смирнова различие наблюдается между сильным ансамблем и остальными алгоритмами.

Набор данных «Energy Efficiency» сформирован с целью прогнозирования нагрузки на отопление в зависимости от восьми различных архитектурных и конструктивных характеристик здания. На этом наборе данных медианное значение ошибки сильного ансамбля, показавшего лучшие результаты, составило 5,91. Критерий Колмогорова-Смирнова указал на наличие значимых различий во всех алгоритмах.

Набор данных «Breast Cancer Wisconsin» предназначен для решения задачи классификации и содержат информацию, позволяющую определить, является ли опухоль доброкачественной или злокачественной.

На данном наборе данных все алгоритмы справились с задачей, тем не менее сильный ансамбль показал меньший разброс. Критерий Колмогорова-Смирнова показал статистически значимую разницу между алгоритмами.

Набор данных «Cammeo and Osmancik» предназначен для решения задачи классификации зёрен двух сортов риса: Cammeo и Osmancik. На данном наборе данных лучшие всего справились модели с максимальным числом вычислений целевой функции для каждой ИНС.

Заключение

Подводя итог можно сказать, что коллективы нейронных сетей на основе модифицированной дифференциальной эволюции показывают хорошие, но не идеальные результаты. Рекомендуется доработка эволюционного алгоритма в части решения задач оптимизации больших размеров (признаков более 1000), а также автоматического подбора параметров в ходе эволюции.

Список литературы

1. *Фуников А.Д., Черноморец А.А., Болгова Е.В., Фефелов О.С., Наджаджра М.Х.* О применении нейронных сетей в задаче обработки изображений дорожного покрытия, Научно-технический вестник Поволжья №4 2025, С 220-225
2. *Das S., & Suganthan P.N.* Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art. IEEE transactions on evolutionary computation, vol. 15, no. 1, 2011, С. 1;
3. *Leo Breiman, Leo Breiman,* Bagging predictors in Machine Learning, 1996, С. 123–140.;
4. UCI Machine Learning Repository: [сайт] URL: https://archive.ics.uci.edu/

2.3.1.

Н.М. Кудрявцев, Е.А. Сопов д-р техн. наук

Сибирский федеральный университет,
Институт космических и информационных технологий,
кафедра «информационные системы»,
nicolay.kudryavtsev@gmail.com

РАЗРАБОТКА ВЕБ-СЕРВИСА ДЛЯ СБОРА И АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ

В работе представлены результаты разработанного сервиса для автоматизированного сбора данных с маркетплейсов «Ozon» и «Эльдорадо». Сервис обеспечивает мониторинг изменения цен товаров и визуализацию этих данных через веб-интерфейс сервиса. Описан алгоритм сбора и актуализации информации о товарах, включая методы обработки изменений структуры веб-страниц. Готовое решение позволяет экспортировать данные в форматах CSV, XML и PDF.

Ключевые слова: *сбор данных, парсинг, веб-скрейпинг, мониторинг цен, электронная коммерция, Puppeteer.js, анализ трендов*.

Введение. Современные системы электронной коммерции сталкиваются с необходимостью оперативного сбора и анализа больших объёмов данных. Ручной мониторинг товаров и их данных неэффективен из-за высокой динамичности информации и частоты её обновления. Автоматизация сбора данных с веб-ресурсов – это важная задача для современных систем электронной коммерции.

Одним из ключевых инструментов автоматизации является веб-скрейпинг («парсинг») – технология программного сбора данных с веб-сайтов с последующей обработкой и анализом. Данное решение позволяет за короткое время обрабатывать тысячи страниц, извлекая и структурируя актуальные данные для дальнейшего анализа. «Парсинг» позволяет:

Сравнивать цены конкурентов в реальном времени.

Отслеживать изменения ассортимента и наличия товаров в магазинах.

Анализировать динамику изменения цен товаров для прогнозирования спроса.

Без «парсинга» интернет-магазинам пришлось бы заполнять сотни карточек товаров вручную – это трудоёмкий процесс, который подвержен ошибкам.

Актуальность разработки обусловлена следующими факторами:

1. Необходимость анализа конкурентов в реальном времени.
2. Рост количества товарных позиций на маркетплейсах.
3. Динамическое изменение структуры веб-страниц, которое требует гибких решений.

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка веб-сервиса для автоматизированного сбора и анализа данных о товарах с маркетплейсов. Сервис осуществляет сбор ключевых данных (название, цена, ссылка и т.д.) и сохраняет эту информацию в базе данных, на основе которой происходит построение графиков с изменением цен товаров во времени.

Для достижения цели в работе решаются следующие задачи:

1. Изучить особенности «парсинг» маркетплейсов, выявить типовые проблемы (например, защита от ботов).
2. Определение структуры базы данных и разработка алгоритмов для сбора и обработки данных.
3. Написание программного кода сервиса: клиентская и серверная части, модуль сбора данных.
4. Проверить устойчивость сервиса к изменениям структуры сайтов маркетплейсов.

Обзор существующих решений. В настоящее время существуют различные подходы к реализации веб-скрейпинга. К ним относятся использование готовых инструментов для автоматизации действий браузера (например, «Selenium WebDriver») или использование статических «парсеров» (например, «BeautifulSoup» или «Cheerio»). Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки:

1. «Selenium WebDriver» подходит для сложных сценариев (например, взаимодействие с Javascript, формы, клики) и позволяет эмулировать поведение реального пользователя, но данный подход обладает высокой ресурсоёмкостью.

2. Статические «парсеры» обеспечивают высокую скорость обработки данных и не требуют высокой ресурсоёмкости, но они уязвимы к изменениям структур страниц. Поэтому они требуют частых доработок для поддержания стабильного функционирования.

Для разработки данного сервиса была выбрана готовая библиотека «Puppeteer.js» для Node.js [1]. Выбранная библиотека сочетает в себе преимущества «Selenium WebDriver» и статических «парсеров»:

1. Поддержка JavaScript-рендеринга, что позволяет корректно обрабатывать страницы сайтов, написанных на React.js, Angular и т.п.
2. Позволяет обходить простые системы защиты от ботов.
3. Интеграция с Node.js обеспечивает удобство для backend-разработки.
4. Работает быстрее, чем «Selenium WebDriver», и не требует высокой ресурсоёмкости.

В работе [2] приводятся преимущества применения «парсинга» для автоматизированного сбора данных с маркетплейсов. Также здесь рассматриваются различные подходы к реализации «парсеров».

В работе [3] содержится сравнительный анализ различных различные подходы к реализации «парсеров». В результате авторы выявляют наиболее эффективные средства «парсинга» для различных областей применения, выделяя как их сильные, так и слабые стороны.

Основная часть. Разработанный сервис собирает ключевые данные о товарах (таблица 1). Затем он обрабатывает её и отправляет информацию серверу.

Таблица 1 – Собираемые сервисом данные

Собираемые данные	**Формат**	**Примечание**
Название товара	Строка	—
Стоимость товара	Число	Эти данные важны для дальнейшей аналитики изменения цен товаров. Изменения цен у товаров фиксируются в отдельной таблице в базе данных.
URL изображения товара	Строка	—
URL товара в интернет-магазине	Строка	—
ID категории товара	Число	Подкатегории у категории «электроника» (телевизоры, телефоны, компьютеры и т.п.).
ID сайта интернет-магазина	Число	—
Дата сбора данных сервисом	Дата	Эти данные важны для дальнейшей аналитики изменения цен товаров и построения графиков изменения цен.

Алгоритм для актуализации собранных информации о товарах включает механизмы для решения типовых проблем:

1. Периодическое изменение названий селекторов на сайте. Проблема решается корректировкой названий селекторов в программном коде.

2. Разные селекторы для стоимости товара со скидкой. Необходимо предусмотреть альтернативные селекторы при сборе данных о стоимости.

3. Товара нет в наличии. Необходимо проверить наличие товара сразу после загрузки страницы – если товара нет в наличии, то программа пропускает его.

На рисунке 2 представлен разработанный алгоритм для реализации сбора и обработки данных товаров.

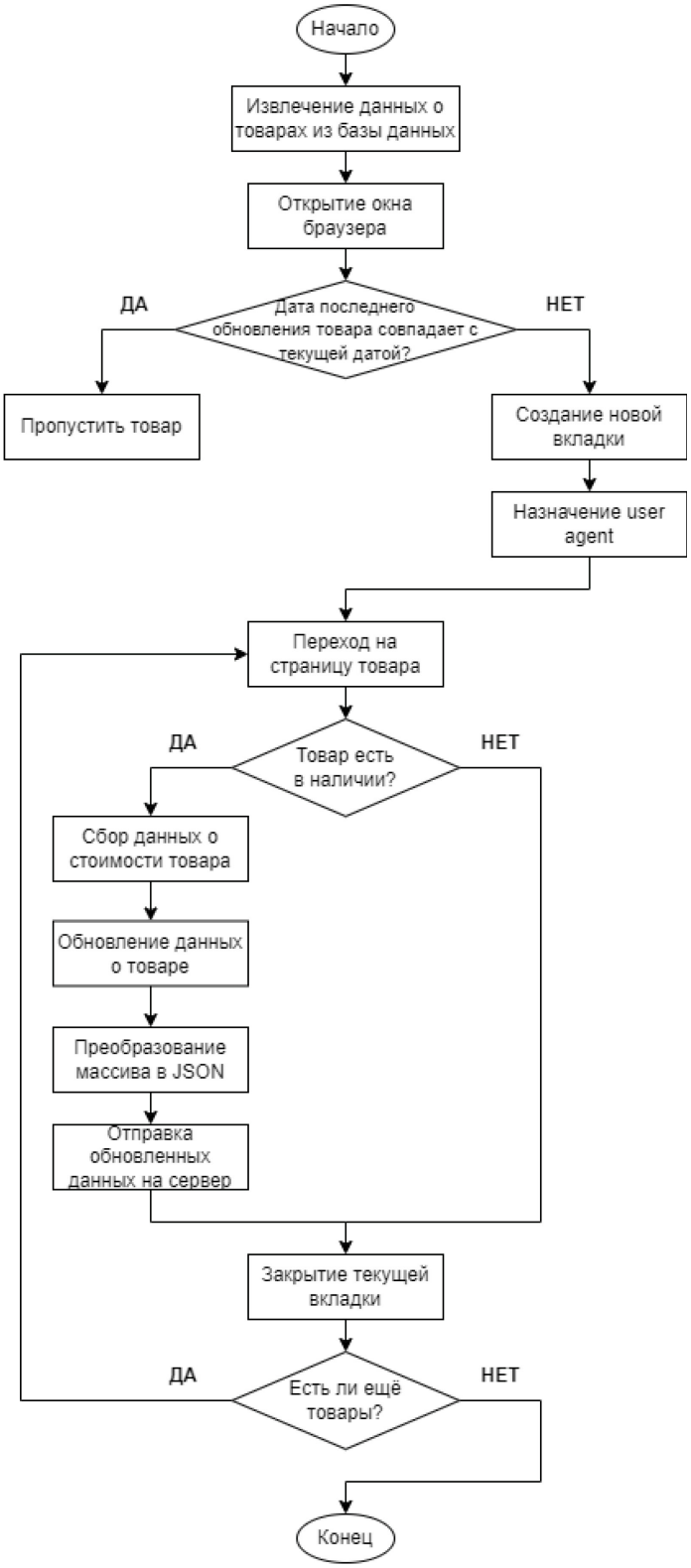


Рис. 1 – Блок-схема алгоритма для актуализации собранных данных

На основе собранной информации на странице сервиса будут отображены графики изменения цен товаров (рисунок 2).

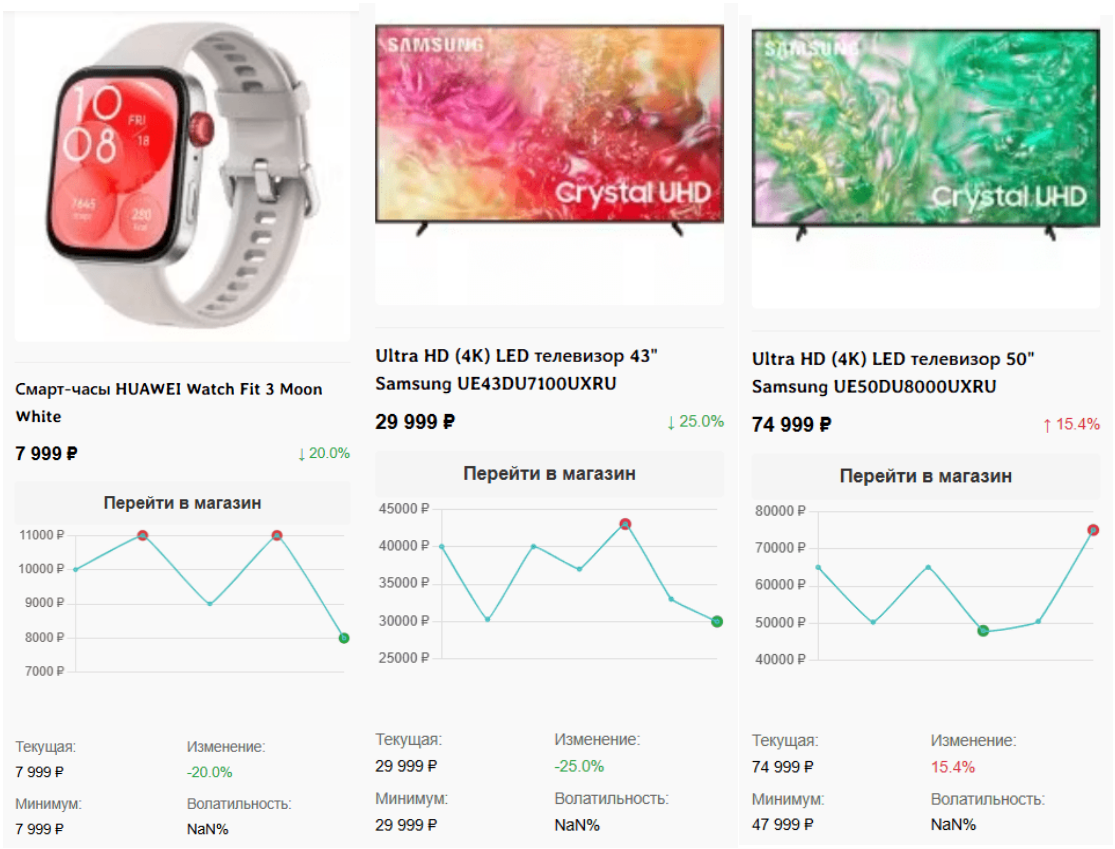


Рис. 2 – Пример мониторинга цен товаров на сайте сервиса

Заключение. Разработанный сервис представляет собой инструмент для анализа конкурентов, который позволяет бизнесу автоматизировать процессы сбора и анализа данных с маркетплейсов.

Одним из итоговых результатов является положительный результат проверки собранных сервисом данных о товарах на актуальность их URL. Другим результатом является возможность пользователя выбирать конкретный интернет-магазин, с которого ему нужно собрать данные. Также пользователь может выбрать определённую категорию товаров, чтобы конкретизировать область сбора данных.

Разработанный сервис позволяет экспортировать собранные данные в файлы форматов CSV, XML и PDF, а также создавать графики, показывающие изменение цен товаров по категориям с течением времени.

Список литературы

1. Официальный сайт Puppeteer.js [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://pptr.dev (дата обращения: 05.07.2024).
2. Извлечение контента с веб-страниц [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://www.researchgate.net/profile/Meltem-Kurt-Pehlivanoglu/publication/265880511_A_Lightweight_Parser_for_Extracting_Useful_Contents_from_Web_Pages/links/54d9d86e0cf24647581f95ec/A-Lightweight-Parser-for-Extracting-Useful-Contents-from-Web-Pages.pdf (дата обращения: 20.10.2024).
3. Сравнение и анализ методов и инструментов, применяемых для сбора данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-i-analiz-metodov-i-instrumentov-primenyaemyh-dlya-sbora-dannyh/viewer (дата обращения: 07.10.2024).

2.3.1.

П.С. Кулясов канд. техн. наук, П.В. Мисевич д-р техн. наук

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт Радиоэлектроники и Информационных Технологий,
Кафедра «Вычислительные системы и технологии»,
Нижний Новгород, p.kulyasov@gmail.com, p_misevich@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ОТОБРАЖЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДИАГРАММЫ EPC В СТРУКТУРУ ДАННЫХ РЕЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Статья посвящена способу построения информационного обеспечения средств автоматизации бизнес-процесса, который представлен моделью в нотациях диаграммы EPC. Рассматривается модификация стандартной диаграммы EPC, к элементам которой можно добавлять значения функций мер и фреймы – инструмент описания ситуации в предметной области автоматизации. Описана логическая схема БД (реляционная модель – структура типа «снежинка»), которая является шаблоном информационного обеспечения, который адаптируется к конкретной диаграмме EPC. Описана технология отображения модели бизнес-процесса в систему таблиц предложенного шаблона. Рассматривается пример построения информационного обеспечения для модифицированной диаграммы EPC.

Ключевые слова: *модель бизнес-процесса, EPC, функция меры, фрейм, многомерная модель, модель снежинка.*

Создатели современных средств автоматизации бизнес – процессов рассматривают диаграммы EPC как часть технического задания – концептуальную модель предметной области, которая с одной стороны машинно-независима, с другой – является основой построения программного и информационного обеспечения.

Классическая диаграмма EPC обладает рядом недостатков. Это:

– отсутствие возможности задавать на элементах диаграммы (события, функции, связи, логические элементы) значения нескольких функций мер;

– отсутствие ситуационного описания, которое привязывается к элементам диаграммы. Это используется для привязки описания предметной области к элементам диаграммы. Ситуация описывает структурой данных множество параметров в предметной области построения диаграммы EPC, которая воспроизводится и имеет ассоциативную связь с элементом модели event-driven process chain. Классическим аппаратом описания ситуаций являются сети фреймов;

– классические диаграммы EPC на уровне концепции не поддерживают возможность использования процедур в качестве элементов описания модели бизнес-процессов.

Для преодоления недостатков авторами предлагается модификацию диаграмм EPC, в которой 1) комментарии могут иметь ассоциативные связи с вершинами (события, функции, логические операторы) и причинно-следственными связями (ребра графа); 2) Элементы ситуационного описания (фреймы) имеют ассоциативные связи с вершинами и ребрами диаграмм EPC; 3) имеется возможность назначать ассоциативными связями значения мер (их может быть неограниченное количество) к событиям, функциям, логическим элементам, причинно-следственным связям; 4) Фреймы в модели EPC имеют неограниченное количество пар «слот-терминал» и процедур – демонов; 5) Демоны могут прикрепляться к имени фрейма (ID) и к парам «слот-терминал».

Такая модифицированная диаграмма EPC – концептуальное описание бизнес-процесса должна стать основой построения программного и информационного обеспечения автоматизированной системы, которая его автоматизирует.

Построим информационное обеспечение бизнес-процесса при помощи реляционной модели БД при помощи СУБД Ms SQL Server. Для этого спроектируем логическую структуру БД, которая поддерживает все элементы модифицированной диаграммы EPC.

Анализ показал, что основой диаграммы является ориентированный граф $G = \{V,E\}$, где V – множество вершин, а G – множество ребер. Такой граф описывается при помощи матрицы инцидентности, которая располагается в центре структуры данных и называется на схеме *CD* – контейнер данных.

Подсхема описания вершин диаграммы EPC (Subschema Vertexes). Для реализации описания модели EPC бизнес-процесса введём таблицу в которой хранится множество вершин *V* и таблицу с перечнем классов вершин *Type_V* (рис. 1). Эти отношения связаны ассоциативной связью типа «один-ко-многим» [1]. К описанию вершин (отношение *V*) можно присоединять неограниченное количество комментариев. Для этого используется таблица с именем *Comment_V*, которая связана с таблицей с именем *V* связью «один-ко-многим». Каждой вершине может соответствовать несколько числовых значений, которые в предметной области играют роль измерений (мер). Значения мер хранятся в таблице с именем *M_V*, которая связана с отношением *V* ассоциативной связью типа «один-ко-многим».

В рамках модификации диаграмм EPC необходимо предусмотреть возможность присоединения к множеству вершин элементов ситуационного описания – фреймов. Для этого используется таблица с именем *F*, которая связана с отношением с именем *V* ассоциативной связью типа «один-ко многим». В таблице с именем *F* хранится имя фрейма (идентификатор ситуационного описания на диаграмме EPC). Остальные элементы описания фрейма (пары слоты – терминалы и процедуры-демоны) описаны ниже. Таблица *V* связана с ассоциативной связью типа «один-ко многим» с таблицей CD.

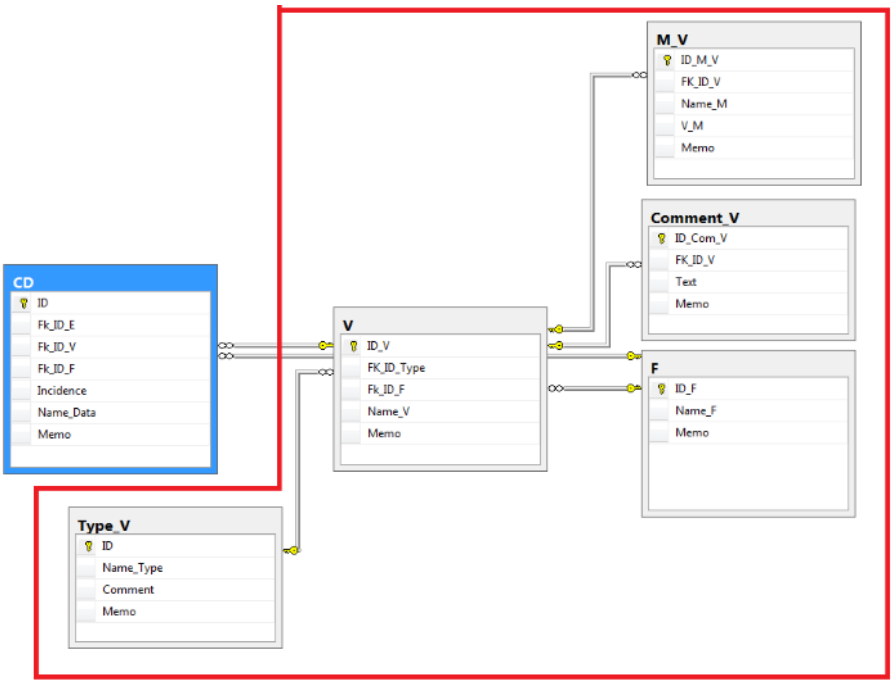


Рис. 1 – Подсхема описания вершин

Подсхема описания ребер (Subschema Edges). Для реализации описания модели EPC бизнес-процесса введём таблицу в которой хранится множество ребер *E* (рис. 2). К описанию ребер (отношение *E*) можно присоединять неограниченное количество комментариев. Для этого используется таблица с именем *Comment_E*, которая связана с таблицей с именем *E* связью «один-ко-многим». Каждому ребру может соответствовать несколько числовых значений, которые в предметной области играют роль измерений (мер). Значения мер хранятся в таблице с именем *M_E*, которая связана с отношением E ассоциативной связью типа «один-ко-многим».

В рамках модификации диаграмм EPC необходимо предусмотреть возможность присоединения к множеству ребер элементов ситуационного описания – фреймов. Для этого используется таблица с именем *F*, которая связана с отношением с именем *E* ассоциативной связью типа «один-ко-многим». В таблице с именем *F* хранится имя фрейма (идентификатор ситуационного описания на диаграмме EPC). Остальные элементы описания фрейма (пары слоты-терминалы и процедуры-демоны) описаны ниже. Таблица *E* связана с ассоциативной связью типа «один-ко-многим» с таблицей *CD*.

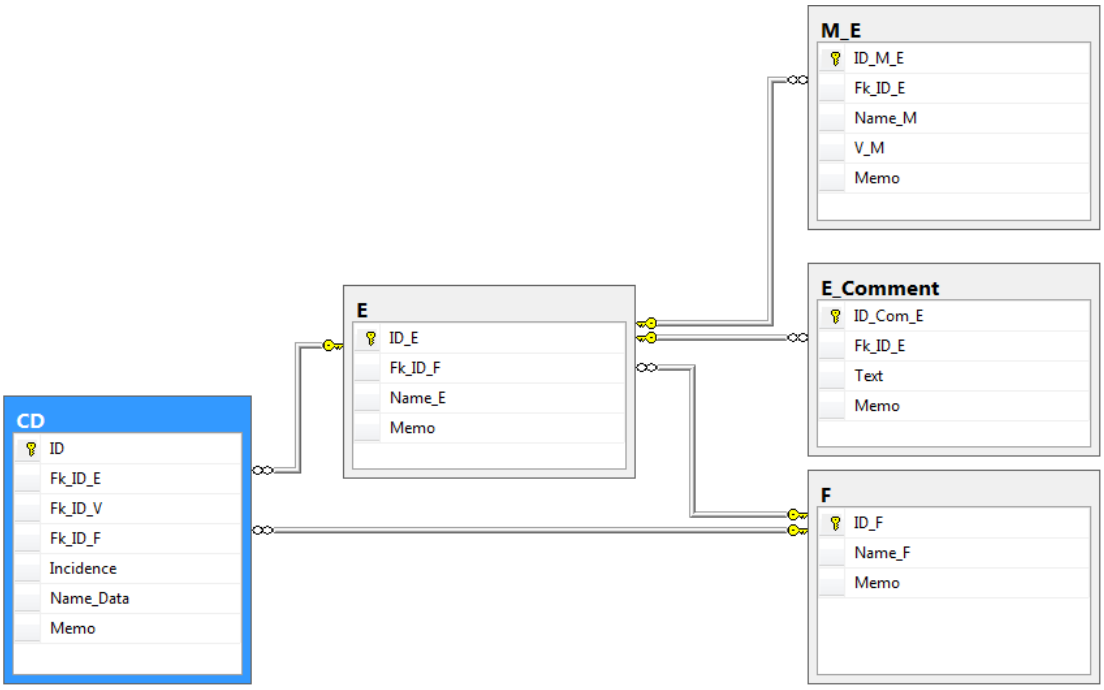


Рис. 2 – Подсхема описания ребер

Описание подсхемы фреймов (Subschema Frames). В предложенной модификации модели бизнес-процессов диаграмме EPC используется ситуационное описание в форме фреймов. Фреймовую форму представления баз знаний предложил Минский Марвин. Фрейм состоит [2] из имени фрейма, множества слотов-терминалов и из процедур-демонов.

Имя фрейма (идентификатор) хранится в таблице с именем *F*. Это ключевой элемент описания фрейма. Множество пар слот-терминал хранится в отношении с именем *S_T*. Таблица *S_T* связана с таблицей *A* связью типа «один-ко-многим». Такая структура данных позволяет включать в каждый фрейм неограниченное количество пар слот-терминал.

Совокупности дескрипторов на процедуры-демоны хранятся в отношении *D*. Таблица *D* связана отношением «один-ко-многим» с таблицей хранения пар слот-терминал (*S_T*). Такое решение позволяет прикрепить неограниченное процедур-демонов к каждой паре слот-терминал.

Таблица хранения дескрипторов на реализацию процедур-демонов связана связью типа «один-ко-многим» с таблицей идентификаторов фреймов *F*. Эта структура данных позволяет ставить неограниченное количество процедур-демонов каждому фрейму.

Отношение с именем *A* связано ассоциативной связью типа «один-ко-многим» с таблицей хранения множества идентификаторов вершин *V*. Таким образом, каждой вершине можно поставит несколько элементов ситуационного описания – фреймов.

Аналогично, связь типа «один-ко-многим» отношения *F* с таблицей хранения идентификаторов ребер (причинно-следственных связей) *E* позволяется поставить несколько фреймов в соответствие каждой причинно-следственной связи.

На схеме видно (рис. 2), что таблица *F* связана ассоциативной связью типа «один-ко-многим» с центральной таблицей *CD*. Такое решение позволяет прикреплять ситуационное описание к каждой записи в таблице инцидентности.

Рассмотрим логическую схему реляционной базы данных, в которую отображаются элементы модифицированной диаграммы EPC (рис. 3). В центре логической схемы размещается контейнер данных (*CD*), который выполняет функции матрицы инцидентности. Матрица инцидентности – одна из форм представления графа, в которой указываются связи между инцидентными элементами графа (ребро(дуга) и вершина). Столбцы матрицы соответствуют ребрам, строки – вершинам. Ненулевое значение в ячейке матрицы указывает связь между вершиной и ребром (их инцидентность). Если ребро входит в вершину, то значение матрицы (в нашем случае – поля в таблице) принимает значение +1. Если ребро выходит, то значение принимает значение -1. Идентификация вершины и ребра осуществляется по значениям вторичных ключей (поля *Fk_ID_E* и *Fk_ID_V*). Матрица *CD* связана отношениями «один-ко-многим» с подсхемами: *Edge*, *Vertexes* и *Frames* (рис. 3).

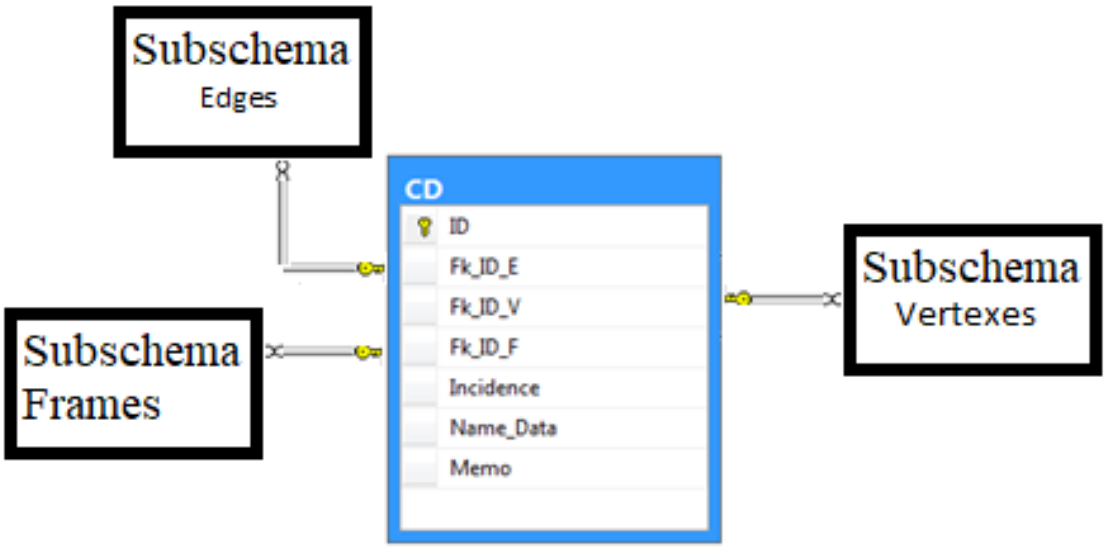


Рис. 3 – Отображение элементов модифицированной диаграммы EPC на логическую схему реляционной БД

Пример. Рассмотрим диаграмму EPC, которая взята из источника [3]. Отметим, что это типовая диаграмма EPC, которая не привязана к конкретной предметной области. В источнике эта диаграмма содержит весь типовой список элементов нотации EPC. Введем в эту диаграмму новые элементы: идентификаторы вершин (*V1*, *V2*, …), идентификаторы ребер (*E1*, *E2*, …), идентификаторы комментариев вершин (*C_V2*, *C_V5*, *C_V6*, *C_V10*, *C_V10-1*, *C_V10-2*), значение мера на вершине *V2* (*M(V2)* = 30), значение мера на ребре *E2* (*M(E2)* = 7), фрейм на вершине *V2* (*FRAME (V2)*. Фрейм описывает ситуацию принятия решения прохождении ветвления (вершина *V3*). Множество вершин помещается в таблицу. В данном примере не используется классификатор вершин (поле *FK_ID_Type*). В примере (рис. 4) фрейм с идентификатором «1» связан с вершиной *V3*. Диаграмма EPC отображается в систему таблиц 1-7, которым соответствуют отношения в БД. Рассмотрим содержание таблиц подробнее.

Множество ребер диаграммы хранится в таблице 1 – отношение хранения в БД множества ребер (имеет имя *dbo.E*).

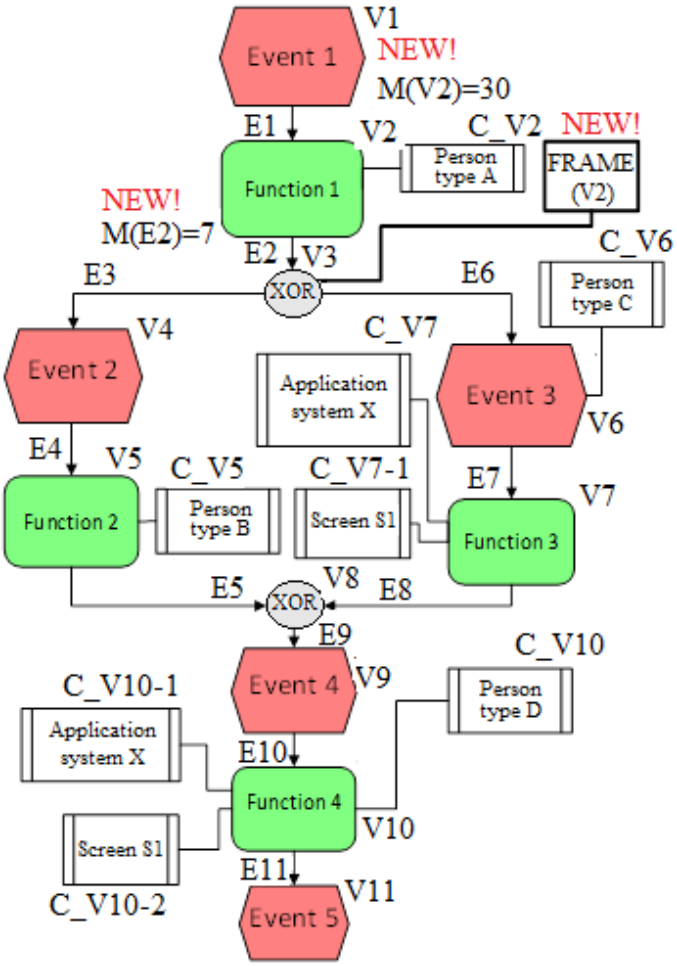


Рис. 4 – Пример модифицированной диаграммы EPC

Матрица инцидентности хранится в таблице 2 – отношение хранения в БД матрицы инцидентности (отношение с именем *dbo.CD*)

Мера вершины (рис. 4) помещается в таблицу 3 – отношение хранения в БД мер вершин (отношение с именем *dbo.M_V*).

Таблица 1– Отношение хранения в БД множества ребер

Имя колонки: ID_V	Имя колонки: Fk_ID_Type	Имя колонки: Fk_ID_F	Имя колонки: Memo
1	NULL	V1	Event 1
2	NULL	V2	Function 1
3	NULL	V3	XOR open
4	NULL	V4	Event 2
5	NULL	V5	Function 2
6	NULL	V6	Event 3
7	NULL	V7	Function 3
8	NULL	V8	XOR close
9	NULL	V9	Event 4
10	NULL	V10	Function 4
11	NULL	V11	Event 5

Таблица 2– Отношение хранения в БД матрицы инцидентности

Имя колонки: ID	Имя колонки: FK_ID_E	Имя колонки: FK_ID_V	Имя колонки: FK_ID_F	Имя колонки: Incidence	Имя колонки: Name_Data	Имя колонки: Memo
1	1	1	NULL	-1	NULL	E1 between V1 and V2
2	1	2	NULL	1	NULL	E1 between V1 and V2
3	2	2	NULL	-1	NULL	E2 between V2 and V3
4	2	3	NULL	1	NULL	E2 between V2 and V3
5	3	3	NULL	-1	NULL	E3 between V2 and V4
6	3	4	NULL	1	NULL	E3 between V2 and V4
7	4	4	NULL	-1	NULL	E4 between V4 and V5
8	4	5	NULL	1	NULL	E4 between V4 and V5
9	5	5	NULL	-1	NULL	E5 between V5 and V8
10	5	8	NULL	1	NULL	E5 between V5 and V8
11	6	3	NULL	-1	NULL	E6 between V3 and V6
12	6	6	NULL	1	NULL	E7 between V3 and V6
13	7	6	NULL	-1	NULL	E7 between V3 and V6
14	7	7	NULL	1	NULL	E6 between V3 and V6
15	8	7	NULL	-1	NULL	E8 between V7 and V8
16	8	8	NULL	1	NULL	E8 between V7 and V8
17	9	8	NULL	-1	NULL	E9 between V8 and V9
18	9	9	NULL	1	NULL	E9 between V8 and V9
19	10	9	NULL	-1	NULL	E10 between V9 and V10
20	10	10	NULL	1	NULL	E10 between V9 and V10
21	11	10	NULL	-1	NULL	E11 between V10 and V11
22	11	11	NULL	1	NULL	E11 between V10 and V11

Таблица 3– Отношение хранения в БД мер вершин

Имя колонки: ID_M_V	Имя колонки: FK_ID_V	Name_M	Имя колонки: V_M	Имя колонки: Memo
1	2	M(V2)	30	MAX execution time of Function 1 (V2)

Мера ребра (рис. 4) помещается в таблицу 4 – отношение хранения в БД мер ребер (отношение с именем *dbo.M_E*).

Таблица 4– Отношение хранения в БД мер ребер

Имя колонки: ID_M_V	Имя колонки: FK_ID_V	Name_M	Имя колонки: E_M	Имя колонки: Memo
1	2	M(E2)	30	Delay

Фрейм имеет вид: Имя фрейма – ветвление V3 (Таблица 5).

Таблица 5– Вид фрейма

Слот фрейма	Терминал
ЕСЛИ Person type B занят	то идти к Event 3
ЕСЛИ Person type B свободен	то идти к Event 2

Структура фрейма прописывается в БД таблицей 6 (отношение с именем *dbo.F*).

Таблица 6– Таблица для хранения структуры фрейма в БД

Имя колонки: ID_F	Имя колонки: Name_F	Memo
1	Logical branching condition V3	Attached to the vertex V3

Пары слот-терминал фрейма помещаются в таблицу 7 (в БД - отношение с именем *dbo.S_T*).

Таблица 7– Таблица для хранения пар слот-терминал в БД

Имя колонки: ID_S_T	Имя колонки: Fk_ID_F	Имя колонки: Fk_ID_D	Имя колонки: Name_S	Имя колонки: Memo_S	Имя колонки: Name_T	Имя колонки: Value_T	Имя колонки: Memo_T
1	1	NULL	the antecedent of the implication	IF PERSON TYPE B is busy then	The consequence of the implication	go to event 3	NULL
2	1	NULL	the antecedent of the implication	IF PERSON TYPE B is not busy then	The consequence of the implication	go to event 2	NULL

Заключение

В работе предложена модификация концептуального описания процессов в предметной области в форме диаграммы EPC. Модифицированная диаграмма поддерживает использование значений меры для вершин и рёбер и фреймов. Также в работе предложена технология отображения элементов модифицированной диаграммы в систему взаимосвязанных таблиц реляционной модели БД.

Система взаимосвязанных таблиц является шаблоном информационного обеспечения автоматизированной системы поддержки бизнес-процесса в форме диаграммы EPC.

Логическая схема шаблона информационного обеспечения соответствует структуре снежинка, которая используется для реализации многомерной модели в реляционных СУБД.

Список литературы

1. *Дейт К. Дж.* Руководство по реляционной СУБД DB2: руководство для пользователей прогр. продукта «IBM Database 2» фирмы IBM. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 319 с.
2. *Минский М.* Фреймы для представления знаний: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.
3. *Etowar I.S.* Using information in EPC Models to control access rights to other systems [Электронный ресурс] // ARIS Community: сайт – URL: https://ariscommunity.com/users/shameem/2009-12-14-using-information-epc-models-control-access-rights-other-systems (дата обращения 30.06.2025).

2.3.1.

Л.С. Ломакина, И.Д. Чернобаев, А.Н. Двитовская, К.А. Корелин, Д.А. Белов

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,
институт радиоэлектроники и информационных технологий,
кафедра «Вычислительные системы и технологии»,
Нижний Новгород, llomakina@list.ru, ichernobnn@gmail.com

ПРОБЛЕМА УСКОРЕНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

В работе рассматривается проблема ускорения процесса принятия решений при диагностировании объектов различной физической природы в контексте задачи классификации состояний объектов. При прогнозировании категорий состояний применяются методы приближенного поиска решения. Искусственные нейронные сети позволяют получать прогнозы с высокой точностью, однако их применение требует объёмной и качественной обучающей выборки, а также длительного обучения. В этой связи для ускорения вычислений и повышения точности прогнозирования в работе рассматривается применение нейросетевые моделей в составе ансамблевых методов машинного обучения. В прикладных задачах классификации технических и медицинских объектов применение ансамблей нейросетевых моделей позволяет ускорить обучение и при этом повысить точность диагностирования на 4 - 6 %.

Ключевые слова: *диагностирование, состояние объекта, нейросетевое моделирование, ансамблевые методы машинного обучения.*

Состояние объекта определяется совокупностью признаков и может рассматриваться как задача классификации [1], решаемая приближенными численными методами машинного обучения. Эти методы применяются при невозможности точного решения за разумное время и наличии множества допустимых вариантов. Один из востребованных подходов — искусственные нейронные сети (ИНС), способные выявлять скрытые зависимости в больших данных. ИНС как универсальный аппроксиматор [2] позволяют точно решать прикладные задачи, обобщая даже непредставленные в обучающей выборке данные.

Обучение ИНС — это итеративная оптимизация параметров, основную вычислительную сложность которой создают операции тензорного умножения [3]. Среди недостатков ИНС отмечают медленное обучение [4], высокие требования к вычислительным ресурсам, сложность интерпретации решений [5] и переобучение, снижающее способность к обобщению. Проблему переобучения обычно решают за счёт объёма и сбалансированности обучающей выборки.

Один из способов ускорения работы ИНС — параллельное выполнение модели на нескольких устройствах [6], что распределяет нагрузку и ускоряет обучение. Эффективным подходом являются ансамблевые методы, которые повышают точность за счёт объединения решений нескольких моделей [7].

Главное преимущество ансамблей — снижение дисперсии за счёт обучения базовых моделей на разных подмножествах данных. Совокупное решение таких моделей обычно точнее, чем прогнозы одной.

В отличие от ИНС, где важна высокая точность одной модели, цель ансамблей — создать набор моделей с разными ошибками, что улучшает обобщение. Однако чрезмерное разнообразие может снизить общую точность из-за противоречивых предсказаний.

Среди основных подходов к построению ансамблей для диагностики объектов выделяют бэггинг, бустинг и стекинг.

Бэггинг — параллельное обучение базовых моделей на разных выборках, случайно сформированных из исходной [8]. Это увеличивает разнообразие и снижает переобучение. Обычно используется с моделями, склонными к переобучению (например, деревья решений или ИНС). Итоговый прогноз формируется путём голосования (для классификации) или усреднения (для регрессии). Метод снижает дисперсию и подходит для распределённого обучения.

Бустинг — последовательное обучение слабых моделей, где каждая новая исправляет ошибки предыдущих [9]. Ошибкам присваивается больший вес, что повышает чувствительность к шумам. Сложные базовые модели могут привести к переобучению, а слишком простые — потребуют много итераций.

Стекинг — объединение разнородных моделей, чьи прогнозы подаются на вход мета-модели [10]. Используется k-fold кросс-валидация для генерации «out-of-fold» прогнозов, исключая переобучение. Наилучшие результаты достигаются при использовании простых мета-моделей. Сложные каскады увеличивают вычислительную нагрузку без гарантии улучшения точности.

В качестве эксперимента рассматривается применение ансамбля нейросетевых моделей к техническим и медицинским объектам.

При работе с техническими объектами использовался набор данных, который, содержащий изображения микроструктуры металла в масштабах x200, x500, x1000, с пятью классами: «0», «20», «35», «50», «65», соответствующим степени разрушения сплавов металлов. Исходные данные содержат 12 изображений размером 1600×1200 пикселей в каждой категории.

Для увеличения объёма обучающей выборки и выполнено разбиение изображений на блоки размером 200×200 пикселей, что позволило увеличить объем исходной выборки до 2880 изображений, из которых тестовая выборка составляет 20% от общего объёма.

В ансамбле по методу бэггинга использовались пять свёрточных нейронных сетей (СНС), обучавшихся параллельно, как показано на рисунке 1. Для каждой модели формировалась обучающая выборка путём случайного отбора 80% изображений и аугментации, обеспечивая разнообразие.

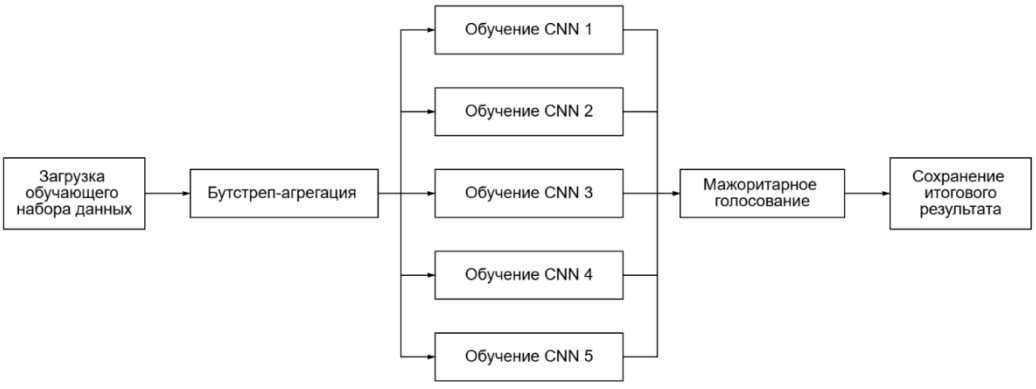


Рис 1 – Схема ансамбля базовых моделей СНС.

После обучения прогнозы объединялись методом мажоритарного голосования. При жёстком голосовании учитываются метки классов, при мягком — усреднённые вероятности.

Результаты в таблице 1 показывают, что ансамбль СНС обеспечивает более высокую точность, особенно при увеличении числа классов. Однако для простых задач (2–3 класса) выигрыш в точности незначителен, что ставит под сомнение оправданность использования ресурсоёмких ансамблей.

Таблица 1 – Точность и время работы базовых моделей и ансамблей.

Классы	СНС (точность, %)	СНС (время, мин)	Анс. СНС (точность, %)	Анс. СНС (время, мин)
0, 50	98.6	3.35	**99.1**	7.82
0, 35, 65	98.5	5.66	**98.8**	11.7
0, 20, 50, 65	93.6	6.97	**95.3**	14.15
0,20,35,50,65	83.5	8.16	**87.7**	18.44

При решении более сложных задач (4-5 классов) ансамбль СНС обеспечивает более высокую точность прогнозирования класса.

Во втором эксперименте решается задача диагностирования пневмонии по рентгеновским снимкам грудной клетки. Из-за неявных и варьирующих признаков патологии особенно важны точность, интерпретируемость и устойчивость модели.

При решении задаи выполняется бинарная классификация — «пневмония» или «норма». В ансамбле использованы архитектуры нейросетевых моделей СНС: ResNet50, DenseNet121 и EfficientNetB4, обученные на одной выборке. Объединение моделей реализовано с применением жёсткого и мягкого голосования, максимального отклика и взвешенного усреднения, как показано на рисунке 2.

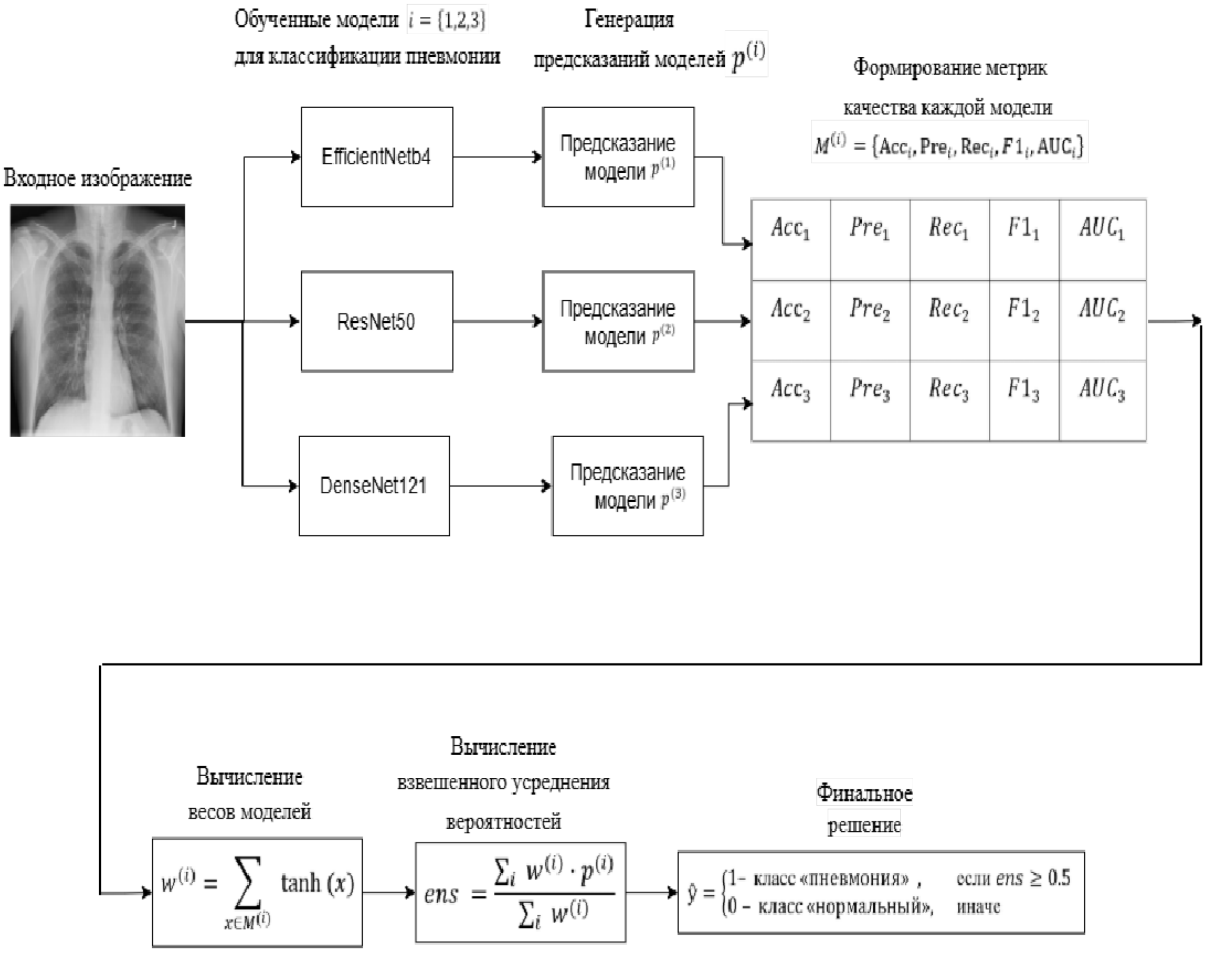


Рис 2 – Схема ансамбля базовых СНС через взвешенное усреднение.

Результаты обучения отдельных базовых СНС и в составе ансамблей приведены в таблице 2. Оценка моделей выполнена с применением метрик точности, полноты, F1-меры и площади под ROC-кривой (AUC-ROC).

Таблица 2 – Результаты классификации базовых моделей и ансамблей.

Модель\Ансамбль	Доля верных ответов	Точность	Полнота	F1-мера	AUC-ROC
ResNet50	0.8487	0.8487	0.8542	0.8495	0.9296
EfficientNetB4	0.8283	0.8172	0.8458	0.8312	0.9179
DenseNet121	0.8454	0.8356	0.8600	0.8477	0.9282
Жёсткое голосование	0.8519	0.8476	0.8581	0.8528	0.9316
Максимальный отклик	0.8518	**0.8494**	0.8555	0.8524	0.9297
Мягкое голосование	0.8500	0.8409	0.8633	0.8519	0.9316
Взвешенное усреднение	**0.8571**	0.8483	**0.8697**	**0.8589**	**0.9406**

Результаты показывают, явное превосходство ансамбля над одиночными моделями, при этом лучшие показатели достигнуты при взвешенном усреднении вероятностей.

Результаты работы подтвердили эффективность ансамблевых методов для диагностики объектов различной физической природы. В работе показано, что параллельное обучение базовых моделей позволяет существенно сократить время построения ансамбля. Ансамблевые методы допускают гибкую настройку под конкретные задачи.

Список литературы

1. *Ломакина Л.С., Двитовская А.Н.* Алгоритмическое и программное обеспечение прогнозирования проблемных состояний технических объектов с использованием ансамблевых технологий машинного обучения. Научно-технический вестник Поволжья. 2023 г. №7 – Казань: ООО «Рашин Сайнс» с. 164-166

2. *Lu Y, Lu J.* A universal approximation theorem of deep neural networks for expressing probability distributions. // Advances in neural information processing systems. 2020;33:3094-105

3. *You J, Leskovec J, He K, Xie S.* Graph structure of neural networks. International Conference on Machine Learning 2020 Nov 21 (pp. 10881-10891). PMLR

4. *Михайлов А.М., Каравай М.Ф., Сивцов В.А.* Мгновенное обучение при распознавании образов // Автоматика и телемеханика, 2022, № 3, стр. 144-155

5. *Saleem R, Yuan B, Kurugollu F, Anjum A, Liu L.* Explaining deep neural networks: A survey on the global interpretation methods. Neurocomputing. 2022 Nov 7;513:165-80

6. *Jia Z, Zaharia M, Aiken A.* Beyond data and model parallelism for deep neural networks. Proceedings of Machine Learning and Systems. 2019 Apr 15;1:1-3.

7. *Bühlmann P*. Bagging, boosting and ensemble methods. In Handbook of computational statistics: Concepts and methods 2011 Dec 21 (pp. 985-1022). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelber

8. *Altman N, Krzywinski M*. Ensemble methods: bagging and random forests. Nature Methods. 2017 Oct 1;14(10):933-5.

9. *Drucker H, Cortes C, Jackel LD, LeCun Y, Vapnik V*. Boosting and other ensemble methods. Neural computation. 1994 Nov;6(6):1289-301.

10. *Kwon H, Park J, Lee Y*. Stacking ensemble technique for classifying breast cancer. Healthcare informatics research. 2019 Oct 31;25(4):283-8.

2.3.1.

Т.И. Мариупольский, Е.В. Храпунова, И.А. Панфилов, М.Б. Хамраев, А.А. Оганисян

Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М. Ф. Решетнева,
институт информатики и телекоммуникаций,
кафедра системного анализа и исследования операций,
Красноярск, crook_80@mail.ru

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ПОЖАРОВ

В статье описываются решения задач анализа данных на основе информации о природных и антропогенных пожарах. Рассматриваются гипотезы задач регрессионного анализа по определению величины ущерба от пожара, определения класса природного пожара, расчета количества пострадавших при пожаре. Разработаны модели машинного обучения для проверки гипотез.

Ключевые слова: *анализ данных, данные о пожарах, алгоритмы машинного обучения.*

Введение

Анализ данных о природных и антропогенных катастрофах – важнейший этап профилактики будущих катастрофических событий. В современных условиях различные ведомства накапливают большие объемы данных о различных инцидентах, природных событиях, действиях подведомственных подразделений. В данной статье рассмотрены такие события как пожары. Природными пожарами в России, в значительной мере, занимается лесоохрана, подчиненная Рослесхозу. Антропогенными пожарами, происходящими преимущественно в населенных пунктах, занимается Пожарная охрана, подчиненная МЧС. Несмотря на разницу в подходах к организации сбора и составу данных, несомненно, события имеют одну природу.

Анализ данных природных пожаров

Принятая классификация лесных пожаров по площади (Класс A: до 0.2 га - легко контролируемые; B: 0.2-2 га - незначительные; C: 2-20 га - умеренные; D: 20-200 га - крупные, трудно сдерживаемые; E: 200-2000 га - масштабные, с большим ущербом; F: свыше 2000 га - катастрофические) отражает тяжесть пожара, определяя потребность в ресурсах и масштаб рисков. В представленной работе разработан метод классификации лесных пожаров, основанный на климатических факторах, структуре лесных массивов, близости к населенным пунктам и способах обнаружения. Анализ проводился с использованием данных метеорологических показателей и параметров земной поверхности, полученных из NASA [1]. Общее число факторов, описывающих пожары, было 48.

В задаче классификации пожаров по масштабу используются различные алгоритмы машинного обучения, каждый со своими сильными сторонами. Среди них 0 – Наивный Байесовский классификатор, 1 – Случайный лес (Random Forest), 2 – Метод k-ближайших соседей (KNN), 3 – Логистическая регрессия, 5 – Решающее дерево (Decision Tree) и 5 – XGBoost. XGBoost демонстрирует наивысшую точность и надежность (см. Рисунок 1).

```
Classification Report:
              precision    recall  f1-score   support

           0       0.78      0.74      0.76        38
           1       0.78      0.80      0.79       134
           2       0.83      0.87      0.85       235
           3       0.86      0.85      0.86       185
           4       0.93      0.82      0.87        91
           5       0.89      0.89      0.89         9

    accuracy                           0.84       692
   macro avg       0.84      0.83      0.84       692
weighted avg       0.84      0.84      0.84       692

MAE: 56.77
RMSE: 149.12
R²: 0.92
```

Рис. 1 – Результат обучения модели для прогнозирования площади пожара

Анализ данных антропогенных пожаров

Помимо поверхностных лесных пожаров, в работе была рассмотрена выборка данных содержащая информацию об антропогенных пожарах. Выборка содержит информацию о более чем 5 млн. инцидентах произошедших в России с 2010 по 2020 годы. Ранее проводился анализ представленной выборки [2], рисунок 2. Были выявлены скрытые закономерности [3]. В частности, решалась задача классификации пожаров на события с пострадавшими и без пострадавших.

	A	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1													
2		2012											
3		Без ущерба				Всего				С ущербом			
4		Кол-во пожаров, ед	Погибших людей, чел	Травмированных людей, чел	Прямой ущерб, тыс руб	Кол-во пожаров, ед	Погибших людей, чел	Травмированных людей, чел	Прямой ущерб, тыс руб	Кол-во пожаров, ед	Погибших людей, чел	Травмированных людей, чел	Прямой ущерб, тыс руб
5	ОКАТО	FW	DW	WW									
6	**Северо-Западный ФО**	**14934**	**1062**	**1232**	**0**	**18037**	**1331**	**1451**	**3457135**	**2915**	**224**	**195**	**1739257**
7	Республика Карелия	1333	80	128		1454	82	139	44975	138	7	7	50674
8	Республика Коми	1170	97	113		1245	98	119	48846	56	0	8	78014
9	Архангельская область	1220	123	122		2026	164	189	319705	805	51	63	333772
10	Ненецкий автономный округ	30	7	9		50	7	12	7134	12	0	0	8403
11	Вологодская область	1067	131	97		1375	178	121	169048	280	30	16	100235
12	Ленинградская область	3152	243	148		3453	261	166	167382	245	12	7	167061
13	г. Санкт-Петербург	3291	148	296		3480	151	304	1480564	228	3	19	660755
14	Мурманская область	1008	24	75		1090	27	82	31891	66	4	3	44594
15	Новгородская область	942	79	92		1165	118	104	979573	210	33	11	104681
16	Псковская область	368	66	31		1175	172	79	94711	699	80	53	88249
17	Калининградская область	1353	64	121		1524	73	136	113308	176	4	8	102817
18	**Центральный ФО**	**21857**	**1676**	**1850**	**0**	**37069**	**2644**	**2623**	**5287426**	**13053**	**863**	**647**	**5426403**
19	Белгородская область	211	13	13		1073	92	59	90640	776	59	43	168101
20	Брянская область	334	19	58		1947	168	120	185707	1558	132	62	252081
21	Владимирская область	1562	155	125		1883	166	135	297140	216	10	14	321869
22	Воронежская область	2243	183	182		2517	198	198	91883	286	11	14	117400
23	Ивановская область	626	90	68		1137	119	99	122905	299	17	20	87660
24	Калужская область	7	0	4		1116	101	61	165534	1074	100	56	219631
25	Костромская область	573	51	57		719	61	64	39415	134	3	5	40855
26	Курская область	374	43	21		636	59	26	100143	317	31	10	240113

Рис. 2 – Агрегированные данные о пожарах

Общий объем рассматриваемой выборки не позволял производить быстрые вычисления. Поэтому был использован подход формирования групповой выборки за отдельные года. Проверялись гипотезы о равенстве математических ожиданий, дисперсий по параметрам в выборках за отдельные года. На рисунке 2 представлено распределение пожаров с пострадавшими и без, по данным за 2020 год. Среди пожаров с пострадавшими порядка 37% - это пожары ставшие причиной гибели людей.

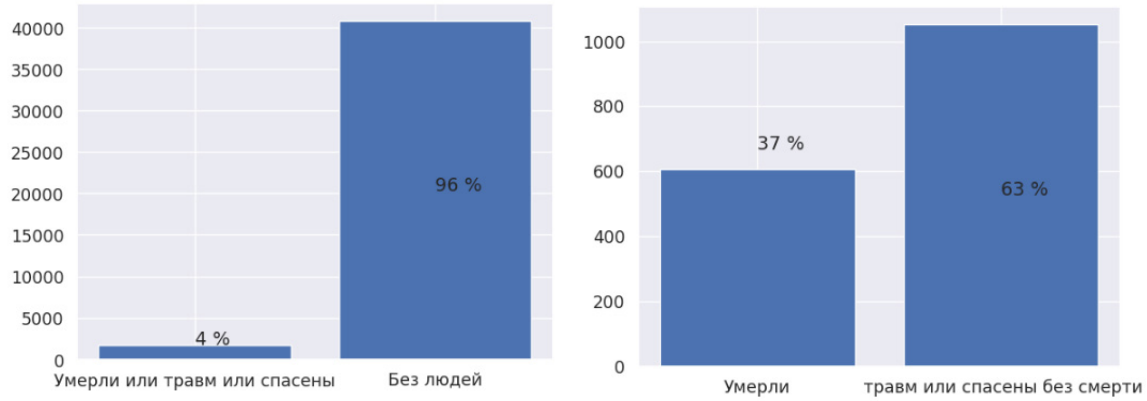


Рис. 3 – Распределение антропогенных пожаров по наличию пострадавших

Однако, наиболее значимые признаки, такие как «прямой ущерб», «число погибших людей», «число травмированных людей» простой корреляцией объяснить не получается. Именно пожары с погибшими являются теми событиями, которые необходимо предотвращать всеми способами [4]. На рисунке 4 показано распределение числа погибших на пожарах по отдельным годам. При этом резко отличающиеся от общего ряда наблюдения нельзя исключать, как статистический выброс. Именно такие события и предстоит спрогнозировать в дальнейшем и предотвратить.

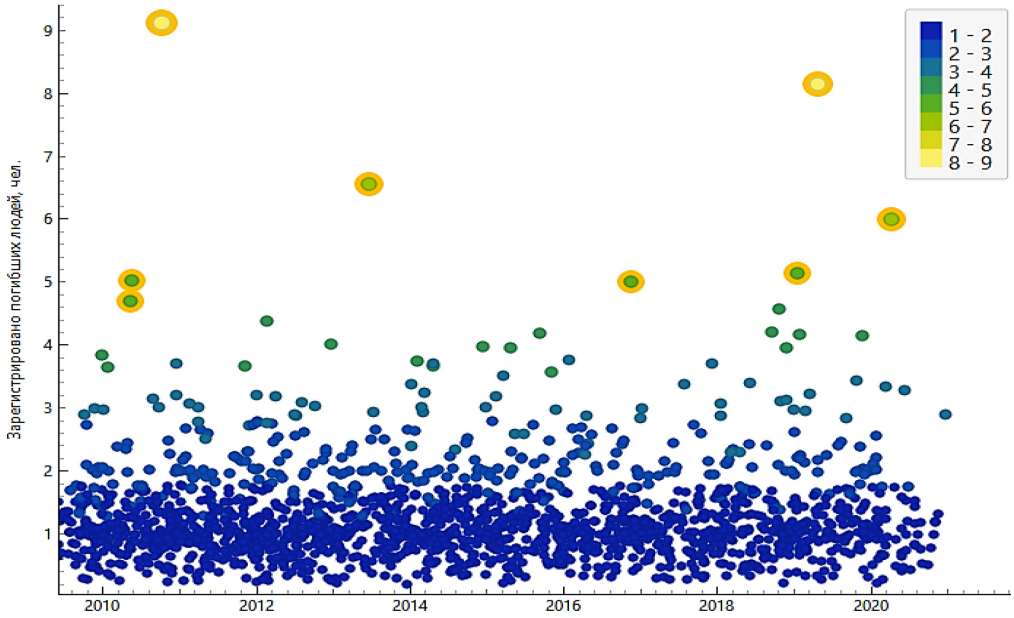


Рис. 4 – Распределение пожаров с погибшими по годам

Было принято решение проводить последовательный анализ имеющихся данных. Была сформулирована задача о построении регрессионной модели для целевого параметра «число погибших людей». Для решения задачи регрессии были выбраны 3 метода: Метод k ближайших соседей, Метод опорных векторов для задачи регрессии и Линейная регрессия [3]. Построение модели производилось с помощью языка программирования Python, использовались библиотеки Pandas и Nampy.

Сравнение качества работы методов производилось по критерию Среднеквадратическая ошибка. Лучший результат удалось получить с помощью метода kNN – 0.54. Методы LR и SVR показали ошибки 0.64 и 0.65 соответственно.

Результат решения задачи нельзя признать отличным. Требуется проводить дополнительные исследования для повышения качества модели. Высокая ошибка может быть объяснена наличием в выборке выбросов. Так в окончательной выборке был обнаружен артефакт – событие, зафиксированное несколько раз (6 раз) содержащее значение количества погибших на пожаре людей 12. Очевидно, что данное событие могло быть зафиксировано в выборке несколько раз, поскольку в его тушении могло принимать участие несколько

пожарных частей. При том, что подавляющее количество пожаров в выборке было без погибших и пострадавших.

Заключение

Предложенные решения можно применять для управления пожарами, раннего предупреждения и распределения ресурсов. Сбор данных и исследование методов анализа в сфере профилактики ЧС следует продолжать и активно интегрировать в информационные системы государственного управления [5].

Список литературы

1. *Romanov A.A., Tamarovskaya A.N., Gusev B.A., Leonenko E.V., Vasiliev A.S., Krikunov E.E.* Catastrophic PM2.5 emissions from Siberian forest fires: Impacting factors analysis. Environ Pollut. 2022 Aug 1:306:119324. doi: 10.1016/j.envpol.2022.119324.

2. *Мариупольский Т.И., Ничепорчук В.В., Кустов Д.В., Панфилов И.А., Храпунова Е.В.* Анализ данных антропогенных пожаров – Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 6. С. 80-82.

3. *Lobkov K., Eremeev D., Rubinskaya A., Melnikova E., Panfilov I.* Determination of the degree of impact of natural disasters on the level of migration of the population by simulation modelling – В сборнике: JAHORINA 2023. Proceedings of the 22nd International Symposium INFOTEH-Jahorina. 2023. С. 10094109.

4. *Арсланов А.М., Сибирко В.И., Мартынов В.А., Ничепорчук В.В.* Техногенные и природные чрезвычайные ситуации в Российской Федерации за 2024 год – Пожарная безопасность. 2025. № 1 (118). С. 131-133.

5. *Храпунова Е.В., Панфилов И.А., Кустов Д.В., Мариупольский Т.И., Сивцова Е.И.* Разработка региональной системы управления чрезвычайными ситуациями – Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 7. С. 206-210.

2.3.1.

Е.Е. Миргородская канд. техн. наук, Д.А. Васильев канд. техн. наук,
О.В. Ушакова канд. физ.-мат. наук, А.Е. Черных,
Н.П. Митяшин д-р техн. наук, Ю.Б. Томашевский д-р техн. наук

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Институт электронной техники и приборостроения,
кафедра «Системотехника и управление в технических системах»,
Саратов, mee85@inbox.ru

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОЛЛЕКТИВА В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА КАДРОВ

В статье предложен алгоритм формирования производственного коллектива на основе компетентностного подхода в условиях, когда число сотрудников меньше числа функциональных позиций. Приведен пример решения конкретной задачи, иллюстрирующий применимость предложенной методики. Проведен анализ ограничения применения методики, связанного с несоответствием временных ресурсов сотрудников и требуемых затрат на выполнение функций позиций.

Ключевые слова: *производственный коллектив, дефицит кадров, оптимизация*.

Введение. Формирование производственного коллектива (ПК) представляет собой актуальную задачу. Качество результата формирования зависит в значительной степени от требований к профессиональным компетенциям для каждой функциональной позиции ПК, наличия претендентов на замещение позиций, удовлетворяющих данным требованиям.

В работе [1] приведена методика решения подобной задачи для элитных групп [2, 3]. Эта методика может быть применена и для формирования ПК в том случае, когда число претендентов на замещение позиций, удовлетворяющих указанным требованиям, существенно превышает число функциональных позиций ПК. Это обстоятельство предопределяет конкуренцию между претендентами, и, следовательно, позволяет ставить и решать задачу оптимального формирования ПК.

Особенности настоящего состояния рынка труда заключаются в том, что в ряде отраслей производства, а также образования, имеется дефицит кадров достаточной квалификации [4, 5]. В связи с этим в настоящей работе ставится задача модернизации моделей и методов, описанных в работе [1], учитывающая указанный кадровый дефицит. Поскольку это свойство рынка труда приводит к совместительству сотрудников на двух и даже более позициях, предлагается модернизация методики формирования ПК с ограничением временного фактора и возможностей перегрузки.

Математическая модель ПК. В настоящей работе ПК представляется, как совокупность множества компетенций *C*, множества функциональных позиций *P* и множества сотрудников *F*.

Во множестве компетенций $C = \{c_i\}, i = \overline{1, N}$ каждая компетенция c_i является набором конкретных знаний, умений и навыков, необходимых для функционирования сотрудника в рассматриваемой предметной области. Здесь предполагается, что компетенции множества в совокупности достаточны для эффективного функционирования ПК.

Множество функциональных позиций $P = \{p_i\}, i = \overline{1, M}$ содержит функциональные позиции p_i (далее – позиции), которые должны быть замещены сотрудниками ПК. Модель позиции p_i представим в виде вектора $\pi_i = [\eta_{i1}, \eta_{i2}, \ldots, \eta_{ij}, \ldots, \eta_{iN}]$, где η_{ij} – достаточный уровень владения сотрудником, занимающим позицию p_i, компетенцией c_j, причём $0 \le \eta_{ij} \le 1$.

Вектор π_i назовем компетентностной моделью позиции.

Множество сотрудников ПК обозначается как $F = \{f_i\}, i = \overline{1,K}$. Модель сотрудника определим вектором $\varphi_i = [\theta_{i1}, \theta_{i2}, \ldots, \theta_{ij}, \ldots, \theta_{iN}]$, где θ_{ij} – уровень владения компетенций c_j сотрудником f_i, причём, как и η_{ij}, эта величина удовлетворяет условию $0 \le \theta_{ij} \le 1$. Вектор φ_i назовем компетентностной моделью сотрудника.

Ниже будем предполагать, что число сотрудников K рассматриваемой ПК меньше числа позиций N, что предопределяет неизбежное замещение нескольких позиций одним сотрудником.

Для дальнейшего использования получим оценку δ_{ij} соответствия компетентностных моделей π_i и φ_j для случая, когда сотрудник f_j занял позицию π_i

$$\delta_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^{N} \eta_{in} \cdot \theta_{jn}^{i}}{\sum_{s=1}^{N} \eta_{is}^{2}}; \theta_{jn}^{i} = \begin{cases} \theta_{jn}, \text{если } \theta_{jn} < \eta_{in} \\ \eta_{in}, \text{если } \theta_{jn} \ge \eta_{in} \end{cases}, n = \overline{1,N}. \quad (1)$$

Ограничение степеней θ_{jn} при их превышении η_{in} необходимо для исключения компенсации ситуаций вида $\theta_{jn} < \eta_{in}$ для других компетенций при их общей оценке.

С формальной точки зрения модели π_i и φ_i можно рассматривать, как нечёткие подмножества множества компетенций [6], в которых значения η_{ij} и θ_{ij} являются степенями принадлежности компетенции c_i подмножествам π_i и φ_i. Такая интерпретация позволяет использовать формализм теории нечётких множеств и нечётких бинарных отношений (НБО).

В частности, это позволяет ввести НБО подобия между позициями множества P. Значения степени подобия позиций целесообразно рассчитывать по формуле

$$\omega_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^{M} \eta_{ji} \cdot \eta_{ki}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{M} \eta_{ji}^{2}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{M} \eta_{ki}^{2}}}, \quad j,k = \overline{1,M}. \quad (2)$$

Построенное таким образом НБО является рефлексивным и симметричным, но, вообще говоря, не является транзитивным [6].

Для дальнейших этапов методики необходимо, чтобы отношение Ω было транзитивным. Поскольку отношение Ω является рефлексивным, транзитивное замыкание производится по формуле [3]

$$T = \Omega^{M-1}, \quad (3)$$

то есть является $(M-1)$-й степенью отношения Ω, где M – число позиций во множестве P. При этом умножение при получении степени понимается, как композиция НБО [6]. Полученное отношение $T = \{t_{jk}\}, j,k = \overline{1,M}$ является рефлексивным, симметричным и транзитивным, то есть нечётким отношением эквивалентности на базовом множестве P.

Для каждого $\alpha \in [0,1]$ может быть построено чёткое транзитивное отношение $T(\alpha) = \{t_{jk}\}, j,k = \overline{1,M}$, которое называется α-уровнем отношения T, по формуле

$$t_{jk}^{\alpha} = \begin{cases} 1, \text{если } t_{jk} \ge \alpha; \\ 0, \text{если } t_{jk} < \alpha. \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, каждое отношение $T(\alpha)$ является отношением эквивалентности и поэтому позволяет осуществлять разбиение множества позиций P на непересекающиеся подмножества позиций, которые называются классами эквивалентности [6]. В частности, отношение $T(\alpha)$ порождает разложение

$$P = \bigcup_{i=1}^{M(\alpha)} R_i(\alpha); R_i(\alpha) \bigcap R_j(\alpha) = \varnothing, i \neq j. \quad (5)$$

Здесь $R_i(\alpha)$ – классы эквивалентности, элементы (позиции) которых подобны друг другу в степени, не меньше, чем α в смысле отношения Ω.

Величина $M(\alpha)$ является числом классов эквивалентности разбиения, отвечающим данной степени подобия позиций α.

Для практически важных случаев $M(1) = M$, так как в этой ситуации каждая позиция абсолютно подобна только самой себе, а каждый класс содержит только одну позицию. С уменьшением α число $M(\alpha)$ уменьшается и при $\alpha \to 0$ число классов стремиться к 1, так как требование к степени подобия снижается.

Оптимизация распределения функциональных позиций по сотрудникам. Для поставленной задачи желательной является ситуация, когда для некоторого α^* число классов $M(\alpha^*)$ становится равным числу сотрудников K. В этом случае может быть поставлена и решена задача оптимального распределения позиций по сотрудникам, которая формулируется следующим образом.

Каждый из K классов полученного разбиения можно принять за обобщенную позицию, в которую входит одна или несколько позиций множества P, причём в последнем случае эти позиции подобны друг другу в смысле отношения Ω со степенью, не меньшей величины α^*. Обозначим классы $R_j(\alpha^*)$ далее без ссылки на величину α^*, как фиксированную, через R_j. Соответствующее разбиение множества позиций на классы вида (5) будем называть оптимальным.

Рассмотрим общий случай, когда ни при каком α число классов эквивалентности по отношению $M(\alpha)$ не равно K. При этом существует минимальный интервал $[\alpha_1, \alpha_2]$ такой, что $M(\alpha_1) = K_1 > K$ и $M(\alpha_2) = K_2 < K$, то есть число классов подобия скачком переходит от значения K_1 к значению K_2. Это значит, что при переходе от α_1 к α_2 один из классов разбиения, построенный для α_2, поглощает $(K_1 - K_2)$ классов разбиения, построенный для α_1.

В этом случае K подмножеств обобщённых позиций построим следующим образом. Из класса разбиения, поглотившего классы разбиения для α_1, удалим последовательно $(K - K_2)$ позиций, образовав из каждой из них по одноэлементному подмножеству – новой обобщенной позиции. Удаляемые позиции выбираются из числа тех, которые в разложении для α_1 содержались в классах, поглощённых при переходе к α_2.

В новом множестве содержится ровно K обобщенных позиций, причем в каждой из них степень подобия не меньше α_2. В дальнейшем решение задачи оптимального распределения позиций между сотрудниками по критерию степени соответствия их компетентностных моделей совпадает с решением, приведенном выше для случая $M(\alpha) = K$.

Для дальнейшего описания введем функцию, определяющую для каждой позиции класс, в который она попала в силу оптимального разбиения,

$$r = \Psi(i). \quad (6)$$

Здесь i – номер позиции, r – номер соответствующего класса.

Для обобщенных позиций R_j введем их модели ρ_j аналогично моделям первоначальных позиций π_i (3). При этом целесообразно минимально требуемой степенью владения компетенцией c_i для обобщенной позиции считать максимальную величину среди соответствующих величин для позиций, входящих в R_j, то есть

$$\rho_i = [\sigma_{i1}, \sigma_{i2}, \ldots, \sigma_{ij}, \ldots, \sigma_{iN}], \quad (7)$$

где $\sigma_{ij} = \max_{v \in V_i} \eta_{vi}$, а V_i – множество номеров позиций, входящих в класс R_j.

Поскольку в рассматриваемом случае число классов (обобщенных позиций) равно числу

сотрудников, то можно ввести коэффициенты соответствия между классами R_j и сотрудниками по формуле

$$\beta_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^{N} \sigma_{in} \cdot \theta^{i}_{jn}}{\sum_{n=1}^{N} \sigma_{in}^2}, i, j = \overline{1,K}; \theta^{i}_{jn} = \begin{cases} \theta_{jn}, \text{если } \theta_{jn} < \sigma_{in} \\ \sigma_{in}, \text{если } \theta_{jn} \geq \sigma_{in} \end{cases}, i, j = \overline{1,K}, n = \overline{1,N}. \quad (8)$$

Ограничение степеней θ_{jn} при их превышении σ_{in} необходимо для исключения компенсации ситуаций вида $\theta_{jn} < \sigma_{in}$ для других компетенций.

Для решения задачи оптимального распределения обобщенных позиций (классов) между сотрудниками необходимо найти взаимно-однозначное отображение (биекцию) между множествами *R* и *P* такое, что

$$\lambda = \sum_{i=1}^{K} \beta_{i\Lambda(i)} \Rightarrow \max. \quad (9)$$

Здесь $\Lambda(i)$ – функция, осуществляющая это взаимно-однозначное отображение так, что

$$j = \Lambda(r), \quad (10)$$

где *j* – номер сотрудника, который соответствует классу с номером *r*.

Такая задача дискретного математического программирования называется задачей о назначении. Существует несколько классических методов ее решения, например, метод Мака и венгерский метод [8, 9]. При малой величине *K* она может быть решена методом перебора [10].

Решив сформулированную задачу о назначении, получим функцию (10), то есть оптимальное распределение классов подобия позиций по сотрудникам. Величина $\nu = \sum_{i=1}^{K} \beta_{i\Lambda(i)}$ является максимальной среди всех *K*! возможных распределений классов подобия позиций по сотрудникам и представляет собой оценку качества оптимального распределения. Максимальное значение этой оценки получится в идеальной ситуации, когда для каждого класса подобия найдется сотрудник, чья компетентностная модель совпадает с компетентностной моделью этого класса. Как следует из формулы (8), каждая величина $\beta_{i\Lambda(i)}$ равна 1, и, следовательно, максимальная оценка $\nu_{\max} = K$, то есть равна числу сотрудников. В связи с этим естественно сравнивать оценку полученного распределения с этим максимально возможным значением, введя относительную оценку

$$\overline{\nu} = \frac{\nu}{K}, \quad (11)$$

которую можно считать компетенцией сформированной ПК.

Имея оптимальное разбиение множества позиций по классам подобия, задаваемым функцией $\Psi(i)$ из (6), и оптимальное распределения классов по сотрудникам, задаваемым функцией $\Lambda(r)$ из (10), получаем результирующее распределение сотрудников по позициям, задаваемое суперпозицией этих функций

$$\Delta(i) = \Lambda(\Psi(i)). \quad (12)$$

Эта функция номеру каждой позиции *i* ставит в соответствие номер занимающего ее сотрудника.

Полученное с помощью решения задачи о назначении отображение Λ является оптимальным с точки зрения максимального соответствия между обобщенными позициями и назначенными им сотрудниками. Для полной оценки качества распределения следует учесть также степень соответствия между каждой позицией и сотрудником, который занимает ее в соответствии с (11).

С помощью функции $\Delta(i)$ и оценок β_{ij} из (1) соответствия компетентностных моделей π_i и φ_j получим результирующую оценку качества распределения позиций по сотрудникам $\Xi(i)=\delta_{i\Delta(i))}, i=\overline{1,M}$. Как следует из формул (1) максимальное значение, которое может принимать величина $\Xi(i)$, равно 1, что происходит в ситуации, когда компетентностные модели *i*-й позиции и сотрудника с номером $\Delta(i)$ совпадают.

Анализ распределения с учетом временных ресурсов. Полученное распределение, даваемое формулой (10), не учитывает временных ресурсов. Учет этих факторов требует соответствующего дополнения моделей сотрудников и позиций. Для модели позиций введем вектор $\pi^t=[\tau_1,\tau_2,\ldots,\tau_i,\ldots,\tau_M]$, в котором τ_i – временной ресурс, необходимый для выполнения функций позиции p_i. Введем также среднее значение временного ресурса позиций данного ПК, рассчитываемое как $\tau^p=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\tau_i$.

Будем считать, что все сотрудники без учета перегрузок располагают одинаковым временным ресурсом τ^f.

Функциональная позиция рассматривается как вакансия, которую должен занять единственный сотрудник, в связи с чем величина τ^p не должна значительно отличаться от временного ресурса τ^f, которым располагает один сотрудник. Поэтому можно положить $\tau^f=\varepsilon\tau^p$, где коэффициент ε близок к 1. Эта величина может выбираться с учетом особенностей предметной области и значения компетенции $\bar{\nu}$, так как при низкой квалификации сотрудников время исполнения функций позиции увеличивается.

В условиях настоящей задачи следует допустить работу сотрудников с временными перегрузками, что и имеет место во многих отраслях производственной деятельности в условиях дефицита квалифицированных кадров. В связи с этим следует ввести допустимый коэффициент перегрузки сотрудника $\xi>1$, величину которого также следует принимать с учетом особенностей предметной области. На практике эта величина часто имеет значение 1.5 («работа на полторы ставки»).

Очевидно, что общий временной ресурс всех позиций не может превышать общий временной ресурс сотрудников с учетом допустимых перегрузок. Поэтому согласно введенным значениям числа позиций и сотрудников необходимым условием разрешимости поставленных задач является выполнение неравенства

$$K\xi\varepsilon > M. \qquad (13)$$

Отсюда может быть найдена минимальная величина ε.

Поскольку в проведенных рассуждениях мы опирались на средние значения временных ресурсов, то даже при выполнении условия (13) в результате реализованного распределения некоторые сотрудники могут оказаться перегруженными по времени.

Реальная временная загрузка сотрудника f_j равна $T_j=\sum_{i\in I_j}\tau_i$, где I_j – множество номеров позиций, которые согласно (12) распределены данному сотруднику, то есть $I_j=\left\{i\middle|\Delta(i)=j\right\}$.

Таким образом, если хотя бы для одного сотрудника f_j имеет место неравенство $I_j>\xi\tau^f$, то полученное распределение недопустимо.

В этом случае для устранения перегрузок может быть выполнена корректировка оптимального распределения за счет передачи одной из позиций другому сотруднику, загрузка которого позволяет это сделать. Однако наличие такого сотрудника методика не гарантирует. Кроме того, такая корректировка приведет к снижению величины компетенции $\bar{\nu}$.

Таким образом, в общем случае в применении описанной методики имеется ограничение, связанное с несоответствием временных ресурсов сотрудников и позиций.

Альтернативой представленной методике может служить модель распределения на основе транспортной задачи линейного программирования [9], в которой перевозке груза соответствует распределение временного ресурса сотрудников по позициям, а минимуму затрат на перевозку – максимум компетенции ПК. Однако решение транспортной задачи предполагает «дробление» перевозимого ресурса, что в случае нашей задачи приведет к разделению временного ресурса сотрудника по нескольким позициям и, как следствие, к чрезмерному усложнению расписания его работы.

Пример применение методики. Рассмотрим задачу оптимизацию формирования ПК, соответствующую следующим значениям характеристик её элементов $N = 12$, $M = 5$, $K = 3$. Модели множества функциональных позиций P и множества сотрудников F представлены в таблице 1, элементами которой являются коэффициенты η_{ij} и θ_{ij}, введенные в формулах (2) – (5).

Таблица 1 – Компетентностные модели множеств позиций и сотрудников

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}
p_1	1.00	0.61	0.48	0.20	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.70	0.90
p_2	0.58	0.51	0.72	1.00	0.92	0.51	0.38	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10
p_3	0.10	0.00	0.00	0.10	0.38	0.91	0.92	1.00	1.00	0.81	0.28	0.00
p_4	0.72	0.51	0.10	0.28	0.00	0.10	0.00	0.20	0.18	0.61	0.92	1.00
p_5	0.00	0.00	0.01	0.71	0.82	1.00	1.00	0.51	0.18	0.00	0.10	0.00
f_1	0.40	0.50	1.00	1.00	1.00	0.50	0.20	0.00	0.00	0.40	0.50	1.00
f_2	0.00	0.25	0.00	0.60	0.25	0.70	1.00	1.00	0.80	0.40	0.30	0.10
f_3	0.70	0.50	0.40	0.25	0.00	0.20	0.40	0.55	0.50	0.80	1.00	0.00

Получим оценки δ_{ij} соответствия компетентностных моделей π_i и φ_j в случае замещения сотрудником f_j позиции π_i, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Соответствие компетентностных моделей позиций и сотрудников

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5
f_1	0.46	0.46	0.20	0.48	0.19
f_2	0.16	0.27	0.50	0.22	0.44
f_3	0.33	0.29	0.35	0.41	0.28

Используя коэффициенты η_{ij}, по формуле (2) строим НБО Ω, характеризующее степень подобия между позициями с точки зрения степени владения компетенциями, матричное представление которого имеет следующий вид

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1 & 0.54 & 0.14 & 0.91 & 0.09 \\ 0.54 & 1 & 0.39 & 0.41 & 0.69 \\ 0.14 & 0.39 & 1 & 0.35 & 0.73 \\ 0.91 & 0.41 & 0.35 & 1 & 0.16 \\ 0.09 & 0.69 & 0.73 & 0.16 & 1 \end{bmatrix}.$$

После транзитивного замыкания этого рефлексивного и симметричного отношения получаем нечеткое отношение T

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0.54 & 0.54 & 0.91 & 0.54 \\ 0.54 & 1 & 0.69 & 0.54 & 0.69 \\ 0.54 & 0.69 & 1 & 0.54 & 0.73 \\ 0.91 & 0.54 & 0.54 & 1 & 0.54 \\ 0.54 & 0.69 & 0.73 & 0.54 & 1 \end{bmatrix}.$$

Поскольку T является отношением эквивалентности, оно может быть использовано для разбиения множества позиций на непересекающиеся классы подобия. Каждый α-уровень

$T(\alpha)$, получаемый из T по формуле (4), является четким бинарным отношением, разбивающим множество P на непересекающиеся классы, внутри которых коэффициенты подобия между позициями не меньше, чем α. Для установления взаимно-однозначного соответствия между множеством классов подобия позиций и множеством сотрудников необходимо, чтобы число классов было равно числу сотрудников, то есть в нашем примере 3. Максимальное число α, для которого это условие выполняется, равно 0.73.

Соответствующие матричное и графовое представления уровня $T(0.73)$ показаны на рисунке 1.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

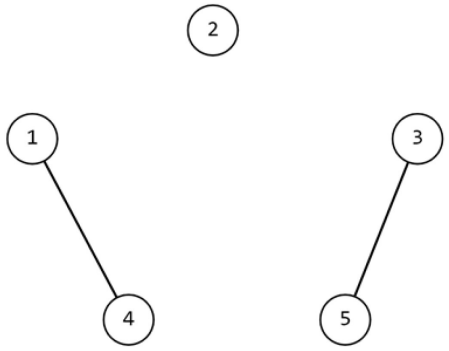


Рис. 1 – Матричное и графовое представление отношения $T(0.73)$

Из рисунка 1 следует, что множество P представлено тремя непересекающимися подмножествами (классами подобия) позиций $R_1 = \{p_1, p_4\}$, $R_2 = \{p_2\}$, $R_3 = \{p_3, p_5\}$, в каждом из которых степень подобия между позициями не меньше 0.73, а функция Ψ из (6) имеет вид

$$\Psi(1) = 1; \quad \Psi(2) = 2; \quad \Psi(3) = 3, \Psi(4) = 1; \quad \Psi(5) = 3. \qquad (14)$$

Построим компетентностные модели классов подобия позиций, используя формулу (7). В таблице 3 столбцы соответствуют компетентностной модели соответствующего класса.

Таблица 3 – Компетентностная модель множества классов подобия позиций

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	c_{12}
ρ_1	1.00	0.61	0.48	0.28	0.10	0.10	0.00	0.20	0.18	0.61	0.92	1.00
ρ_2	0.58	0.51	0.72	1.00	0.92	0.51	0.38	0.00	0.10	0.10	0.10	0.10
ρ_3	0.10	0.00	0.01	0.71	0.82	1.00	1.00	1.00	1.00	0.81	0.28	0.00

Имея компетентностные модели классов и сотрудников, рассчитаем коэффициенты соответствия между классами R_i и сотрудниками по формуле (8). Матрица этих коэффициентов имеет вид

$$D = \begin{bmatrix} 0.31 & 0.14 & 0.29 \\ 0.29 & 0.16 & 0.18 \\ 0.13 & 0.35 & 0.20 \end{bmatrix}.$$

Строки матрицы D соответствуют классам подобия позиций, столбцы – сотрудникам. Используя эту матрицу, найдем оптимальное взаимно-однозначное отображение Λ из (10), которое обеспечит максимальное значение величины (9). В силу малой размерности задачи соответствующая задача о назначении решается перебором. Среди девяти возможных вариантов оптимальным является отображение

$$\Lambda(1) = 3; \quad \Lambda(2) = 1; \quad \Lambda(3) = 2; \qquad (15)$$

то есть с учетом (6) первый сотрудник занимает вторую позицию, второй сотрудник занимает третью и пятую позиции, а третий сотрудник – первую и четвертую позиции. Значение величины λ, соответствующее этому назначению, равно $\nu = 0.29 + 0.29 + 0.35 = 0.93$. Оно является абсолютной оценкой соответствия распределения, однако ее необходимо соотнести с максимально возможным значением $\nu_{\max}$, которое достигается в идеальном случае совпадения компетентностных моделей каждого класса с моделью одного из сотрудников. Поскольку в этом случае каждая из величин равна 1, то величина $\beta_{i\Lambda(i)}$ равна числу слагаемых (сотрудников) и в нашем случае равна трем. Таким

образом, относительная оценка полученного распределения равна $\bar{\nu} = \nu / \nu_{max} = 0.96/3 = 0.32$.

Суперпозиция полученных функций Ψ (14) и Λ (15) задает искомое распределение позиций по замещаемым их сотрудникам. Соответствующий результат показан во втором столбце таблицы 4.

Учитывая оценки δ_{ij} соответствия компетентностных моделей позиций π_i и сотрудников φ_j согласно формулам (1), а также полученное распределение позиций по классам подобия (14) и взаимно-однозначное соответствие между множеством классов подобия позиций и множеством сотрудников (15), получим результирующие оценки компетентностного обеспечения позиций $\Xi(i)$, приведенные в третьем столбце таблицы 4.

Таблица 4 – Результирующее назначение сотрудников по позициям и оценки соответствующего компетентностного обеспечения

Позиции	Сотрудники	Оценки компетентностного обеспечения
1	1	0.33
2	2	0.46
3	3	0.50
4	1	0.41
5	3	0.44

Заключение. В работе предложен алгоритм формирования ПК в условиях кадрового дефицита, когда число сотрудников меньше числа функциональных позиций и это приводит к необходимости совмещения. Алгоритм основан на компетентностном подходе к оценке требований к сотрудникам, предполагаемым к замещению конкретных позиций. Введенные компетентностные модели и оценки соответствия между ними позволили поставить и решить задачу оптимального назначения сотрудников по позициям с точки зрения наилучшего их компетентностного соответствия в целом по ПК. Проведен анализ ограничения на применение алгоритма, связанного с учетом временных ресурсов при совмещении сотрудниками замещения нескольких позиций, неизбежных в поставленной задаче.

Список литературы

1. *Миргородская Е.Е. и др.* Компетентностный подход к моделированию элитных групп // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 10. –
С. 139-145.
2. *Ефимов А.Н.*, *Кутеев В.М.* Исследование и моделирование некоторых свойств элитных групп // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1980. – № 3. – С. 177-185.
3. *Перегудов Ф.И.*, *Тарасенко Ф.П.* Введение в системный анализ. – М.: Радио и связь, 1989. – 320 с.
4. *Морозова О.И., Семенихина А.В.* Проблемы кадрового дефицита в условиях цифровой экономики // МНИЖ. – 2020. – № 6-4(96). – С. 93-97.
5. *Чжэн К., Курникова А.О.* Дефицит квалифицированных кадров в России // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: сборник докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 16-18 мая 2018 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – С. 246-251.
6. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
7. *Банди Б.* Методы оптимизации. Вводный курс: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.
8. *Цирель С.В.* Венгерский способ. – Москва: УРСС, 2007. – 120 с.
9. *Вагнер Г.* Исследование операций. – М.: Мир, 1972-1973. Т. 1-3.
10. *Миргородская Е.Е. и др.* Алгоритм решения несимметричной задачи о назначении с ограничениями // Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании: сб. тр. IV Междунар. науч.-практ. конф., г. Балаково, 16 декабря 2021 г. – Балаково, 2022. – Т. 1. – С. 278-284.

2.3.1.

Д.Р. Новиков, В.Р. Козлов, К.Е. Долженко, В.Д. Хашин

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева»,
Институт информатики и телекоммуникаций,
кафедра системного анализа и исследования операций,
Красноярск, dan362novikov@yandex.ru

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ В ЗАДАЧАХ БАНКОВСКОГО СКОРИНГА

В работе исследуется применение методов дифференциальной эволюции (DE) для решения задачи банковского скоринга. Проведено сравнение эффективности классических схем DE (DE/rand/1, DE/rand/2, DE/current-to-best/1, DE/rand-to-best/1) и их адаптивных модификаций (JDE, SHADE) на тестовых функциях и реальных данных. Также проведен анализ важности признаков для оценки кредитоспособности клиентов.

Ключевые слова: *дифференциальная эволюция, банковский скоринг, оптимизация, машинное обучение, классификация.*

Введение

Современные банковские системы сталкиваются с необходимостью точной оценки кредитоспособности клиентов для минимизации финансовых рисков. Традиционные методы машинного обучения, такие как Random Forest и XGBoost, требуют значительных вычислительных ресурсов и тщательной настройки параметров. В этой связи актуальным становится применение метаэвристических алгоритмов, таких как дифференциальная эволюция (DE), которые обладают высокой адаптивностью и эффективностью в задачах глобальной оптимизации. Однако метаэвристики, такие как (DE), не гарантируют, что оптимальное решение когда-либо будет найдено [1].

Целью данной работы является исследование эффективности различных схем DE для оптимизации параметров модели банковского скоринга и сравнение их с традиционными методами.

Оптимизация – процесс поиска характеристик, обеспечивающих наилучшее решений [2]. Бывает глобальной или локальной, многокритериальной или однокритериальной, условной и безусловной. В данных задачах будут решать задачи глобальной оптимизации.

Объект исследования

Основные модификации алгоритма метода дифференциальной эволюции связаны с дополнительными проверками полученных в ходе мутации и кроссинговера генами особей, а также с методами обработки целочисленных значений [3].

В качестве объекта исследования выступили алгоритмы дифференциальной эволюции и их модификации: Классические схемы: DE/rand/1, DE/rand/2, DE/current-to-best/1, DE/rand-to-best/1.

Адаптивные алгоритмы: JDE (Self-Adaptive Differential Evolution), SHADE (Success-History Based Adaptive Differential Evolution).

Для тестирования использовались: Тестовые функции (Растригина, Ackley) для оценки сходимости и точности алгоритмов. Набор данных о клиентах банка (атрибуты: статус счета, кредитная история, сумма кредита и др.), где целевой переменной являлась кредитоспособность клиента (1 -надежный, 2 - ненадежный).

Методы и алгоритмы

1. Дифференциальная эволюция

DE - это метод оптимизации, основанный на идеях естественного отбора. Инициализация популяции - создание случайных решений (векторов весов). Мутация - генерация новых решений на основе комбинации существующих. Скрещивание - обмен компонентами между решениями. Селекция - выбор лучших решений для следующей итерации. Адаптивные модификации (JDE, SHADE) автоматически настраивают параметры мутации и скрещивания, что повышает их устойчивость.

2. Решение задачи скоринга

Задача формулируется как минимизация логистической потери:

$$Loss(W) = -\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[y_i \log(\sigma(X_i W)) + (1 - y_i)\log(1 - \sigma(X_i W))] \rightarrow min$$

где σ - сигмоидная функция, W - вектор весов.

Результаты

1. Тестирование на тестовых функциях

Функция Растригина: Лучшие результаты показал DE/current-to-best/1 (Mean = 0.0210 для 2-D). Функция Ackley: Наименьшая ошибка достигнута алгоритмом SHADE (Mean = 2.9156 для 2-D).

Так же алгоритмы тестировались на бенчмарке, результат которого показан на рисунке 1.

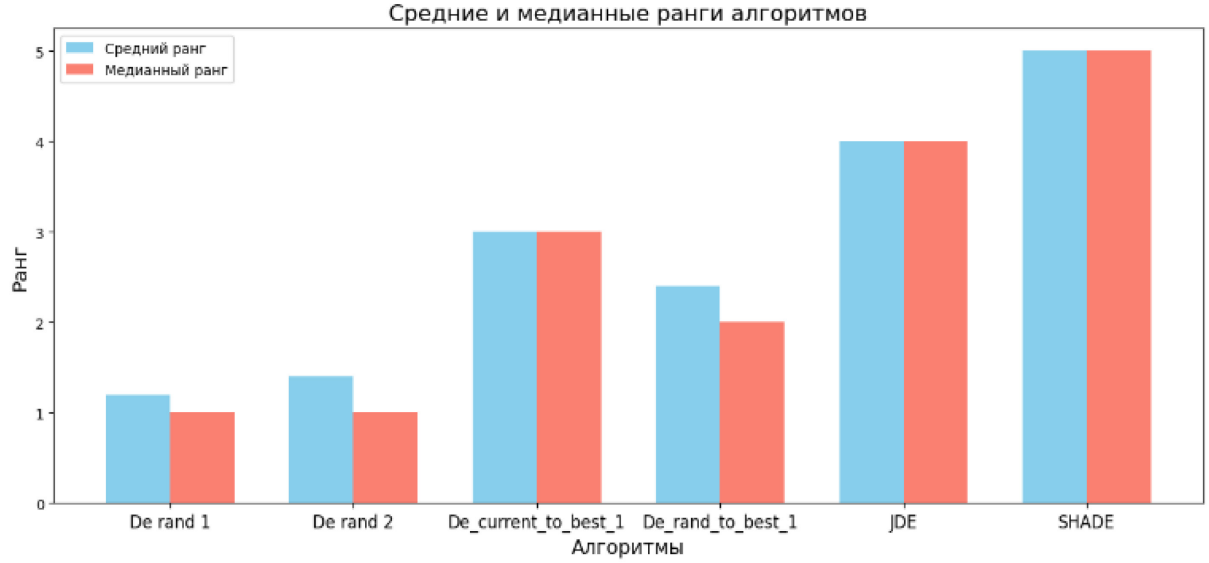


Рис. 1 - Диаграмма ранжирования алгоритмов

2. Банковский скоринг

Результаты решения банковского скоринга представлены на таблице 1, на ней показана «точность алгоритмов», то есть на сколько меньше было неверно определенных клиентов на столько и выше показатель точности

«Accuracy».

Таблица 1 – Результаты точности работы алгоритмов

Алгоритм	Mean Accuracy	Std Accuracy	Min Accuracy	Max Accuracy
SHADE	0.756667	0.019090	0.713333	0.790000
DE/current-to-best/1	0.753833	0.019756	0.723333	0.786667
DE/rand-to-best/1	0.751167	0.024546	0.703333	0.816667
DE/rand/1	0.732000	0.023627	0.690000	0.793333
JDE	0.729000	0.032440	0.673333	0.783333
DE/rand/2	0.701167	0.039767	0.640000	0.763333

На таблице 2 показан такой показатель как «Recall», чем больше этот показатель, тем вернее алгоритм определил клиента.

Таблица 2 – Recall работы алгоритмов

Алгоритм	Recall плохих клиентов %	Recall хороших клиентов %
SHADE	0.50	0.90
DE/current-to-best/1	0.48	0.91
DE/rand-to-best/1	0.46	0.91
DE/rand/1	0.41	0.91
JDE	0.41	0.81
DE/rand/2	0.38	0.86

В таблице 3 показаны результаты решения задачи скоринга другими методами, чтобы сравнить эти результаты с лучшим методом SHADE.

Таблица 3 – Результаты работы алгоритмов

Модель	Accuracy	Recall плохих клиентов	Recall хороших клиентов
Random forest	0.759167	0.39	0.92
XGBoost	0.732333	0.67	0.75
Нейронная сеть	0.719	0.49	0.81
SHADE	0.756667	0.51	0.91

3. Важность признаков

В таблице 4 показаны веса атрибутов клиентов, то есть самые значимые признаки, которые больше всего влияют на решение метода определить клиента в «плохих» или «хороших».

Наиболее значимые атрибуты: Статус текущего счета (вес = 0.7478). Наличие иностранного работника (вес = 0.5389). Статус предыдущего кредита (вес = 0.4402).

Таблица 4 – Результаты точности работы алгоритмов

Описание	Вес
Account Balance	0.747811
Foreign Worker	0.538863
Payment Status of Previous Credit	0.440161
Value Savings/Stocks	0.410249
Instalment per cent	-0.371545
Credit Amount	-0.294207
Duration of Credit (month)	-0.293045
Most valuable available asset	-0.204710
Guarantors	0.190752
Length of current employment	0.182707

Заключение

Проведенное исследование подтвердило эффективность дифференциальной эволюции в задачах банковского скоринга. Адаптивные алгоритмы (SHADE, JDE) демонстрируют высокую точность и устойчивость, что делает их перспективными для практического применения. Однако для улучшения показателя Recall плохих клиентов требуется дальнейшая оптимизация.

Перспективы:

Интеграция DE с другими методами машинного обучения.

Исследование влияния дополнительных признаков на качество модели.

Список литературы

1. *Сопов А.Е., Сопов Е.А.* Алгоритм дифференциальной эволюции с адаптивным компонентным скрещиванием при решении задач глобальной оптимизации «Черного ящика» – Системы управления и информационные технологии. 2025. № 1 (99). С. 49-54.
2. *Панфилов И.А., Липинский Л.В., Полякова А.С., Гуменникова А.В.* Нечеткая селекция в генетическом алгоритме для решения задач многокритериальной оптимизации – Перспективы науки. 2022. № 10 (157). С. 28-33.
3. *Лунева А.А., Лунева С.Ю.* Параметрический синтез нечеткой системы управления типа Такаги–Сугено – Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 5. С. 124-127;

2.3.1.

А.В. Прописнова, П.Г. Михайлова канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,
кафедра кибернетики химико-технологических процессов,
Москва, 190918@muctr.ru

РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГРУЗОВ С ОПАСНЫМИ ХИМИЧЕСКИМИ ВЕЩЕСТВАМИ В УСЛОВИЯХ ВНЕДРЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЕРЕВОЗОЧНЫХ ДОКУМЕНТОВ

В статье исследуется потребность в создании электронных транспортных документов в контексте разработки информационной системы для безопасной автомобильной перевозки опасных грузов. Разработанная система предоставляет грузоотправителям, грузополучателям и перевозчикам инструменты для формирования и изменения электронных перевозочных документов, в том числе транспортных накладных. Незарегистрированные пользователи могут ознакомиться с функционалом на примерах без возможности создания или скачивания документа. Авторы анализируют предпосылки создания системы и подводят итоги разработки.

Ключевые слова: *Государственная информационная система электронных перевозочных документов, электронный документооборот, электронная транспортная накладная, информационная система, опасные грузы.*

Введение

Электронный документооборот (ЭДО) в сфере грузоперевозок был запущен в 2022 году и уже на данный момент он переведен Министерством транспорта в режим полноценной и добровольной эксплуатации [1]. Начиная с 1 сентября 2026 года, российское законодательство, в соответствии с поправками к федеральному закону «О внесении изменений в ФЗ «О транспортно-экспедиционной деятельности» и отдельные законодательные акты РФ», подписанными президентом В.В. Путиным, предписывает обязательный переход на электронные перевозочные документы в сфере грузоперевозок [2]. Данный переход повысит конкурентоспособность российских международных транспортных коридоров за счет создания национальной цифровой транспортно-логистической платформы.

Цифровое решение на государственном уровне

В рамках проекта разработана ГИС ЭПД – государственная информационная система электронных перевозочных документов [3]. Она предоставляет участникам рынка грузоперевозок, через операторов ЭПД, платформу для хранения, обмена и подписания документов в режиме онлайн, а также обеспечивает быструю передачу данных контролирующим инстанциям.

ГИС ЭПД функционирует следующим образом [4]: участник транспортного процесса создаёт электронный перевозочный документ и направляет его оператору информационной системы (ИС) ЭПД (это может быть IT-компания, участник экосистемы или сам перевозчик, если у него есть собственная система). Далее оператор передает документ в ГИС ЭПД, обеспечивая поступление юридически значимой информации в государственные органы (ФНС, МВД, Ространснадзор, Минцифры, Минтранс). Наконец, ГИС ЭПД генерирует QR-код, который оператор ИС ЭПД возвращает участникам перевозки для идентификации и проверки подлинности документа. Каждый электронный перевозочный документ снабжается уникальным QR-кодом – оптическим средством передачи данных, позволяющим сотрудникам контролирующих органов (например, ГИБДД или Ространснадзора) быстро проверить его легитимность с помощью планшетов, сканирующих файлы.

Особое место в грузоперевозках занимает автомобильный транспорт как самый востребованный и мобильный [5]. С ноября 2024 года утвержден приказами ФНС России перечень из шести форматов электронных перевозочных документов для осуществления процесса перевозки грузов автомобильным транспортом: транспортная накладная, заказ-наряд, сопроводительная ведомость, путевой лист, заказ (заявка), договор фрахтования [6].

Каждый вышеперечисленный документ состоит из нескольких файлов обмена (титулов). Предусмотрены отдельные формы титулов для перевозчика, грузоотправителя, грузополучателя. Например, в состав электронной транспортной накладной входит восемь файлов обмена, которые содержат в себе около 1600 атрибутов – разделов с данными (к примеру, описание груза, сведения об опасных грузах и т.д.). Первые четыре титула являются обязательными, так как отражают основные этапы: подготовку, погрузку и разгрузку; шестой и седьмой титулы являются опциональными: используются по усмотрению грузоотправителя и перевозчика для целей бухгалтерского учёта; два последних титула заполняются только при изменении маршрута, водителя или транспортного средства.

Операторы и сервисы для работы с электронным документооборотом

Разработкой и внедрением систем для работы с электронными перевозочными документами в России занимаются различные компании, которые должны входить в реестр информационных систем. Это и операторы электронного документооборота, и разработчики специализированного программного обеспечения (ПО). Среди них особо выделяются операторы ГИС ЭПД, обеспечивающие взаимодействие участников грузоперевозок. Кроме того, некоторые компании предлагают сервисы для работы с ЭПД, интегрированные в их собственные платформы ЭДО [7].

Среди операторов ГИС ЭПД выделяют: ООО «Такском», АО «ПФ «СКБ Контур», ООО «Компания «Тензор», и др. [8]. Примером сервиса для обмена электронными перевозочными документами является сервис 1С-ЭПД от АО «Калуга Астрал», интегрированный с 1С и работающий в рамках ГИС ЭПД.

В настоящее время не существует единого фиксированного реестра операторов ИС электронных перевозочных документов. Разработка информационной системы и её регистрация через онлайн-портал соответствующего ведомства существенно ускорит электронный документооборот. Это особенно актуально, учитывая постоянный рост числа электронных документов (уже сейчас оформляется порядка 1,5 миллиона ежемесячно) и подключение новых участников перевозок.

Создание информационной системы

Электронные перевозочные документы (ЭПД) вскоре станут обязательными для перевозки определенных категорий товаров, таких как опасные грузы, зерно, древесина и алкоголь.

Для информационной поддержки процесса транспортировки опасных грузов разработана система, включающая два приложения с разными уровнями доступа: для авторизованных и неавторизованных пользователей. Интерфейс двух приложений различается не только по содержанию, но и по функциональности, так обычный пользователь может только ознакомиться с ИС, а авторизованный – использовать предлагаемые ему возможности в соответствии с его ролью: грузоотправитель, грузополучатель и перевозчик.

В качестве нормативной базы для разработки ИС использовались: Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов (ДОПОГ), ГОСТ Р 57478-2017 «Грузы опасные. Классификация и маркировка», ГОСТ 26319-2020 «Грузы опасные. Упаковка», ГОСТ Р 57479-2017 «Грузы опасные. Маркировка» и ГОСТ 30333-2022 «Паспорт безопасности химической продукции».

Система построена по трёхуровневой клиент-серверной архитектуре. Это объясняется тем, что благодаря такому подходу наш проект будет легко масштабируемым и более управляемым, что позволяет оптимизировать настройку ресурсов каждого сервера, обеспечивая гибкость и эффективность работы. Разработка велась с использованием высокоуровневого Python-фреймворка Django в среде Visual Studio Code. Адаптивный веб-

интерфейс создан с помощью CSS-фреймворка Bootstrap. База данных системы содержит структурированную информацию по шести типам электронных перевозочных документов и связанным с ними файлам обмена. Например, в электронной транспортной накладной первый обязательный файл обмена заполняется грузоотправителем и включает 53 раздела. Данные об опасных грузах содержатся только в трех из них: «Описание груза», «Сведения об опасном грузе» и «Сведения о сопроводительных документах»; и распределены по 37 таблицам, содержащим сведения о свойствах груза, паспорте безопасности, упаковке, маркировке, необходимой документации и допустимых типах тары.

Заключение

Разрабатываемая информационная система позволит оптимизировать управление автомобильными перевозками опасных грузов. Она предоставляет инструменты для создания и корректировки электронных перевозочных документов, например, электронных транспортных накладных. Система обеспечивает хранение и обработку данных о свойствах опасных грузов, их упаковке, маркировке, сопроводительной документации и действиях при аварийных ситуациях. Обмен этой информацией в режиме реального времени между участниками перевозок повышает прозрачность и контроль над всем процессом транспортировки, а также позволит повысить оперативность принятия решений при нештатных ситуациях, возникающих при транспортировке опасных грузов. Дальнейшая работа будет направлена на разработку генерации сопроводительных документов для первого файла обмена, предоставление грузоотправителю возможности просмотра и редактирования полностью заполненного титула 1, а также создание остальных обязательных файлов обмена для грузополучателя и перевозчика. Завершающим этапом станет формирование и вывод готовой электронной транспортной накладной в формате PDF.

Список литературы

1. Как обязательный ЭДО изменит грузоперевозки с 1 сентября 2026 года [Электронный ресурс] // Платформа цифровизации бизнеса». Режим доступа: https://platformaofd.ru/news/kak-obyazatelnyj-edo-izmenit-gruzoperevozki-s-1-sentyabrya-2026-goda/(дата обращения: 04.07.2025).

2. Постановление Правительства РФ от 21.12.2020 N 2200 (ред. от 30.12.2022) «Об утверждении Правил перевозок грузов автомобильным транспортом и о внесении изменений в пункт 2.1.1 Правил дорожного движения Российской Федерации» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс». Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_371981/ (дата обращения: 04.07.2025).

3. Государственная информационная система электронных перевозочных документов ГИС ЭПД [Электронный ресурс] // ГИС ЭПД Минтранс России». Режим доступа: https://public.epd-portal.ru/ (дата обращения: 04.07.2025).

4. *Кобозева Н.Г.* Развитие транспортных систем в условиях внедрения цифровой государственной информационной системы «Электронные перевозочные документы» // Санкт-Петербург. – Первое экономическое издательство. – 2023. – Т. 13. – №. 12. – С. 6009-6018.

5. *Слепов Д.С.* Интеллектуальные и современные информационные технологии в области автомобильных грузоперевозок: опыт России //Пенза. – Международный центр научного сотрудничества «Наука и просвещение». – 2024. – С. 32-36.

6. Перечень форматов, утвержденных ФНС России [Электронный ресурс] // Федеральная налоговая служба». Режим доступа: https://www.nalog.gov.ru/rn77/related_activities/el_doc/el_bus_entities/approved_formats/ (дата обращения: 04.07.2025).

7. *Алексеева С.Д., Иванов С.А.* Автоматизация электронного документооборота логистической компании за счет внедрения информационной системы Диадок // Санкт-Петербург. – Сборник научных трудов совета молодых учёных СПбГЛТУ. – 2024 – С. 4-12.

8. Перечень операторов электронного документооборота [Электронный ресурс] // Федеральная налоговая служба». Режим доступа: https://www.nalog.gov.ru/rn77/oedo/search_edo/ (дата обращения: 04.07.2025).

2.3.1.

М.Р. Ремизов, А.М. Мартиросян, Д.М. Мартиросян, С.П. Дюсьмекеев, С.Т. Хасанов

Саратовский государственный технический университет,
Институт электронной техники и приборостроения,
Саратов, alvova@mail.ru

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

В работе представлены результаты исследования надежности беспроводных сетей датчиков (БСД). Рассмотрены недостатки известных моделей БСД. Предложена математическая модель на базе групповой модели подсетей БСД. Получены формулы расчета показателей надежности в условиях ресурсных ограничений с использованием модели в виде блок-схемы надежности.

Ключевые слова: *беспроводная сеть датчиков, блок-схема надежности, подсеть БСД, надежность сети, ресурсные ограничения.*

Несмотря на широкое распространение уже в течение длительного периода времени в различных отраслях телекоммуникационных сетей (ТКС), по-прежнему актуальной остается проблема обеспечения их надежности [1–3]. В этом плане до сих пор требуют решения задачи анализа, оценки и методики определения (расчета) надежности ТКС. Наибольший интерес представляют эти вопросы для беспроводных ТКС (БТКС), в частности для БТКС в виде беспроводных сетей датчиков (БСД) [4, 5].

Современные БСД чаще всего представляют собой распределенные по площади, в общем случае по пространству, сложные сетевые структуры. БСД могут содержать большое количество (иногда до тысяч) сенсорных узлов (датчиков), предназначенных для сбора данных различной физической природы с целью последующей их передачи удаленному адресату (приемнику-пользователю). Необходимо отметить, что БСД, как правило, имеют ограниченные ресурсы, в первую очередь, энергетического и вычислительного характера. Это, к сожалению, часто сужает функциональные возможности БСД, снижает потенциальную способность долговременной непрерывной работы, ведет к необходимости принятия специальных мер по повышению их надежности в условиях ресурсных ограничений [6, 7].

Анализ на базе системного подхода влияния ресурсных ограничений различного характера на надежность БСД позволяет сделать вывод о существенном отрицательном влиянии энергетических ограничений при использовании, в первую очередь, аккумуляторного или батарейного видов источников питания (ИП) для энергообеспечения БСД. Как показывает анализ, предложено несколько стратегий для оптимизации энергопотребления (увеличения срока службы сети) и повышения надежности (увеличения вероятности доставки пакетов данных) БСД. Однако ни одна из них не решает в полной мере указанной проблемы. Так, к примеру, стратегии, связанные со снижением энергопотребления, отрицательно влияют на надежность сети, а практически любые стратегии по повышению надежности БСД ведут к неизбежному требованию увеличения энергозатрат и, как следствие, к уменьшению времени надежной работы устройств БСД и сети в целом. При этом в любом случае падает и экономическая эффективность эксплуатации БСД [8].

Вообще говоря, задача оптимизации работы БСД в условиях вынужденных энергетических ограничений, является отдельной и, к сожалению, не имеющей общего решения задачей, требующей разработки специфических математических моделей оценки и управления БСД с учетом энергопотребления в каждом конкретном случае.

Известные модели БСД характеризуются следующими типичными недостатками.

Экспериментальные модели с реальными устройствами и узлами БСД требуют больших временных затрат, причем с необходимостью исключения ряда узлов сети из структуры БСД на время исследования.

Большинство имитационных моделей, рассматривая синтез, передачу, обработку и прием пакетов данных, учитывает в основном влияние сетевых каналов, но без учета влияния сбоев в работе узлов сети.

Частично этих недостатков лишены некоторые аналитические модели, например, на базе Марковских представлений. Однако, как показано в [9], наибольший интерес представляют собой математические модели адаптивных БТКС на основе полумарковских процессов, позволяющие обеспечить существенное повышение надежности сетей, в том числе и с учетом возможных сбоев в работе узлов. Однако при этом не рассматриваются ограничения по энергопотреблению.

Еще одним общим недостатком большинства предложенных моделей является то, что оценивается надежность всей БСД, а не отдельной ее части. При этом предполагается, что все узлы сети имеют равные значения параметров надежности, а это существенно снижает адекватность моделей по отношению к реальному состоянию БСД. К тому же, эти модели обычно не позволяют учитывать изменения параметров напряжения и тока в реальном времени как фактор, влияющий на надежность узлов датчика. Кроме того, они не учитывают алгоритмы и протоколы маршрутизации, используемые в БСД.

В этом контексте в данной работе рассматривается модель, главной особенностью которой является возможность оценки надежности каждой (любой) отдельно взятой части БСД — подсети БСД (субсети). Предлагаемая модель позволяет также учесть влияние на надежность алгоритмов маршрутизации, используемых в БСД. Исследование конкретных подсетей позволяет оценить влияние их узлов, каналов, маршрутизаторов на надежность сети с целью принятия специальных мер оптимизации БСД. При этом могут быть определены необходимые действия, например, добавление дополнительных узлов датчиков, изменение алгоритма маршрутизации или корректировка протоколов для оптимизации конкретных подсетей и, следовательно, сети в целом. Важно подчеркнуть, что такой подход к оценке надежности на базе исследования отдельных подсетей позволяет также выявить и прогнозировать влияние состояния ИП каждой подсети на ее работоспособность, что принципиально для оценки надежности БСД в условиях ограничения энергообеспечения сети.

Используем для оценки надежности подсети БСД блок-схему надежности (БСН). Функционально подсеть содержит узел датчика (в более общем случае — узлы датчиков) и так называемые информационные каналы (ИК), структурно представляющие собой совокупность устройств канального кодирования-декодирования (кодеки) и каналы связи (КС) [10-13].

Для простоты, поскольку в настоящей работе не затрагиваются вопросы кодирования-декодирования передаваемых сообщений (пакетов), будем считать, что имеет место структура, показанная на рисунке 1.

Пусть подсеть S_j ($1 \le j \le N$) сети S, содержащей N подсетей, состоящая из элементов $C=\{c_i\,(1 \le i \le n_j)\}$ (n_j — число элементов подсети с номером j), может находиться в рабочем состоянии или в состоянии отказа. Пусть дискретная случайная величина x_{ji} описывает состояние соответствующего элемента с номером i в подсети j , тогда:

$$x_{ji} = \begin{cases} 0, \text{ отказ компонента } x_{ji}; \\ 1, \text{ компонент } x_{ji} \text{ - работоспособен.} \end{cases}$$

Вектор $\mathbf{x_j} = (x_{j1}, x_{j2}, \ldots, x_{ji}, \ldots, x_{jnj})$ — вектор состояния подсети S_j. Аналогичным образом можно описать состояние всей сети S с помощью структурной функции сети — дискретной переменной $\phi(\mathbf{x}) = \phi(x_1+\ldots+x_N)$:

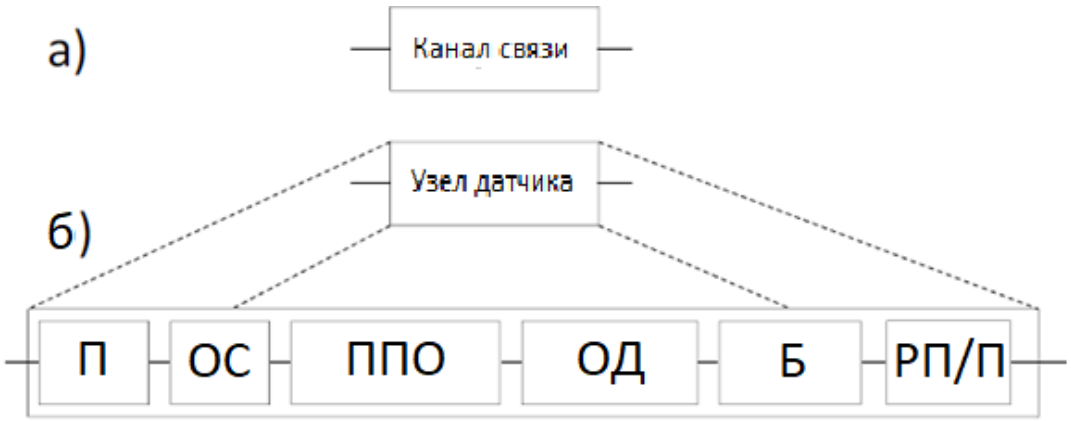


Рис. 1 - Основные блоки модели надежности:

П - приложение; ОС - операционная система; ППО - промежуточное программное обеспечение; ОД - оборудование датчика (*hardware*); Б - батарея питания; РП/П - радиоприемник/передатчик

$$\varphi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & \text{сеть в нерабочем состоянии;} \\ 1, & \text{сеть в рабочем состоянии.} \end{cases}$$

Для любого компонента c_i:

$$\phi(\mathbf{x}) = x_i\phi(1_i, \mathbf{x}) + (1 - x_i)\phi(0_i, \mathbf{x}), \quad (1)$$

где $\phi(1_i, \mathbf{x}) = \phi(x_1,\ldots,1_i,\ldots,x_n)$, а $\phi(0_i, \mathbf{x}) = \phi(x_1,\ldots,0_i,\ldots,x_n)$.

В уравнении (1) первое слагаемое $x_i\phi(1_i, \mathbf{x})$ соответствует компоненту c_i в рабочем состоянии, а состояния остальных элементов могут быть какими угодно, в частности, задаваться случайным образом. Второе слагаемое $(1–x_i)\phi(0_i, \mathbf{x})$ соответствует нерабочему состоянию c_i, а состояние других элементов может быть произвольным.

Для характеристики состояний подсети в конкретный момент времени t переменные состояния компонентов необходимо интерпретировать как случайные величины в момент времени t:

$$\phi(\mathbf{x}_{ji}(t)) = \phi(x_{i1}(t),\ldots, x_{inj}(t)).$$

Надежность подсети можно определить как вероятность соответствующего события (состояния) $R_{Sj}(t) = P\{\phi(\mathbf{x}_{jj}(t))=1\}$.

Если считать, что случайная величина $\phi(\mathbf{x}_{jj}(t))$ распределена по закону Бернулли [186], то показатель $R_{Sj}(t)$ надежности определится как математическое ожидание $E\{\phi(\mathbf{x}_{jj}(t)\}$ функции $\phi(\mathbf{x}_{jj}(t))$:

$$R_{Sj}(t) = E\{\phi(\mathbf{x}_{jj}(t)\}.$$

Используя для определения надежности модель в виде БСН, легко учесть практически любые варианты структурных схем подсетей БСД. При этом любые структурно сложные подсети могут быть всегда преобразованы в более удобные с точки зрения расчета надежности эквивалентные структуры на базе последовательных, параллельных и последовательно-параллельных (комбинированных) простейших структур.

Аналогично может быть определена надежность полной сети, если вычислена надежность всех подсетей БСД.

Пусть в общем случае сеть состоит из $N=n+m$ подсетей, n из которых соединены последовательно и имеют соответствующие значения $R_{Si}(t)$ надежности, а одна из них содержит m параллельных подсетей со значениями $R_{Sj}(t)$ надежности. Тогда, если отсутствуют обратные связи между подсетями, а все элементы сети имеют только два возможных состояния — рабочее и нерабочее (отказы не зависят друг от друга), — то функцию надежности БСД можно представить в виде [14–16]:

$$R(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t)\left[1 - \prod_{j=1}^{m}(1 - R_j(t))\right].$$

Эта формула расчета показателя надежности БСД требует проведения предварительного анализа и определения показателей $R_{Si}(t)$ и $R_{Sj}(t)$ надежности для всех N подсетей БСД. При этом важным достоинством предложенной модели является возможность в реальном времени через определенные промежутки времени корректировать показатели надежности в зависимости от состояния неперезаряжаемых ИП (в соответствии со структурой на рисунке 1). Дискретность контроля и коррекции показателей надежности в общем случае может быть различной для каждой из N подсетей. Это создает условия для прогнозирования изменения показателей надежности в зависимости от текущего состояния ИП для каждой подсети, выявляя наиболее критичные с точки зрения энергозависимости подсети [17, 18].

В заключение следует сказать, что такая модель БСД на основе групповой модели подсетей дает возможность также исследовать надежность сети в зависимости от алгоритмов маршрутизации и протоколов обработки пакетов данных.

В случае, когда подсети принципиально различны по количеству датчиков, помехоустойчивости КС в составе ИК, предложенная модель БСД может быть базовой для оптимизации подсетей и сети в целом. Например, с точки зрения оптимального управления трафиком, что для сложных БСД позволяет решать наилучшим образом задачи надежной передачи данных, в частности в условиях ресурсных ограничений.

Список литературы

1. *Mahdy A., Deogun J.S.* Wireless Optical Communications: a Survey // Proc. of the 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conf. – Atlanta, USA: IEEE, 2004. – P. 2399-2404.
2. *Li G., Xu Z., Xiong C., Yang C., Zhang S., Chen Y., Xu S.* Energy-efficient Wireless Communications: Tutorial, Survey, and Open Issues // IEEE Wireless Communications, 2011. – Vol. 18, – Iss. 6. – P. 28-35.
3. *Li P., Huang X., Fang Y.* Capacity Scaling of Multihop Cellular Networks // Proc. of the IEEE INFOCOM Conf. – Shanghai, China: IEEE, 2011. – P. 2831-2839.
4. *Ghosh A., Wolter D.R., Andrews J.G., Chen R.* Broadband Wireless Access with WiMax/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential // IEEE Communication Mag., 2005. – Vol. 43. – No. 2. – P. 129-136.
5. *Stankovic J.A., Wood A.D., HeGreig D.* Realistic Applications for Wireless Sensor Networks. – Theoretical Aspects of Distributed Computing in Sensor Networks. Monographs in Theoretical Computer Science. An EATCS Series. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. – P. 835-863.
6. *Akyildiz I.F., Su W.*, Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless Sensor Networks: a Survey // Computer Networks, 2002. – Vol. 38. – No. 4. – P. 393-422.
7. *L'vov A.A., Klenov D.V., Kuzin S.A., Svetlov M.S., L'vov P.A.* Radar-Based Wireless Sensor Network for Distributed Measurement Systems // Proc. of the Int. Conf. on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – Minsk, Belarus, 2018. – P. 1-6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457040.
8. *Nassr M.*, *Jun J., Eidenbenz S., Hansson A., Mielke A.M.* Scalable and Reliable Sensor Network Routing: Performance study from field deployment // Proc. 26th IEEE INFOCOM. – Anchorage, USA: IEEE, 2007. – P. 670-678.
9. *Mishchenko D.A.* Mathematical model of the control system for network with recovery / M.S. Svetlov, A.A. L'vov, I.M. Svetlov, N.S.Vagarina, M.K. Svetlova // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»: в 2 т. / под.ред. Н.К. Юркова. - Пенза: ПГУ, 2018. – Т. 1. – С. 242-245.
10. *Trivedi K.S.* Probability and Statistics with Reliability, Queueing and Computer ScienceApplications. – Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2002. – p. 830.
11. *L'vov A.A., Svetlov M.S., Klenov D.V.* The Principles of Ensuring High Reliability of Remote Test Monitoring // 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). – Saratov, Russia: IEEE, 2016. – P. 1-5. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879036.

12. *Svetlov M.S., L'vov A.A., Dolinina O.N., Klenov D.V.* Self-Synchronized Encoding and Decoding Algorithms Based on Code Signal Feature // Proc. of the 27th Int. Conf. RADIOELEKTRONIKA. – Brno, Czech Republic: IEEE, 2017. – P. 1-5. DOI: 10.1109/RADIOELEK.2017.7936641
13. *L'vov A.A.* Synchronization Techniques for the Information Channel with Codec Based on Code Signal Feature / Svetlov M.S., Klenov D.V., L'vov A.A., Svetlova M.K. // Proc. of the Int. Conf. on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – Minsk, Belarus: IEEE, 2018. – P. 1-6. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018. 8457052/
14. *Svetlov M.S., L'vov A.A., Klenov D.V., Sytnik A.A., Dolinina O.N., Svetlova M.K.* Information channel synthesis for remote test monitoring // Proc. of the Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov, Russia: IEEE, 2018. – Vol. 1. – P. 101-104.
15.*Мищенко Д.А.* Математическая модель информационно-коммуникационных сетей / М.С. Светлов, А.А. Львов, Д.А. Мищенко, Н.С. Вагарина // «Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2018»: Материалы 13 Междунар. науч.-технич. конф. : в 2 т. Саратов: СГТУ, 2018. – Т.2. – С. 195-198.
16. *Mishchenko D.A*. Mathematical model of interactive networks / M.S. Svetlov, N.S. Vagarina, M.K. Svetlova, D.A. Mishchenko // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2018) [Электронный ресурс]: труды Международной научно-технической конференции / под ред. С.А. Прохорова. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2018. – С. 923-926
17. *Mishchenko D.A.* Synthesis of the Information Channel with Codec Based on Code Signal Feature / D.V. Klenov, M.S. Svetlov, A.A. L'vov, M.K. Svetlova, D.A. Mishchenko // Proc. of the International Conference on Information Technologies: Information and Communication Technologies for Research and Industry (ICIT 2019). – Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 199: Recent Research in Control Engineering and Decision Making. – Springer Nature Switzerland, 2019. – P. 199-214.
18 *Svetlov M.S.* Increasing of information reliability of digital communication channels under conditions of high intensity noise / Svetlov, M.S. [et. al.] // Dynamics of systems, mechanisms and machines (Dynamics-2016): Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference. — Omsk, 2016. IEEE Catalog Number: CFP16RAB-CDR. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819025.

2.3.1.

Р.А. Симонов, П.А. Шагалова, Д.В. Волкова, Р.С. Кузьмин

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева,
Кафедра Информатика и системы управления,
Нижний Новгород, simonov_ra@mail.ru, polli-shagalova@yandex.ru,
darya-volkova-04@yandex.ru, roman.kuzminsh-9@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ СЦЕНАРИЕВ ПОВЕДЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В статье рассматривается процесс разработки нейронной сети для генерации синтетических данных, в частности журналов событий информационных систем. Реализованный подход, основанный на совместном использовании рекуррентной и генеративно-состязательной сети, позволяет получить реалистичные, логически связанные и разнообразные сценарии поведения системы.

Ключевые слова: *нейросетевые технологии, рекуррентные сети, генеративно-состязательные сети, журналирование информационных систем.*

Введение. В связи с ростом объёма данных и усложнением IT-инфраструктур увеличивается потребность в эффективных методах тестирования и оценки надежности информационных систем. Одним из критически важных ресурсов для решения этих задач являются журналы событий - логи, содержащие информацию о действиях пользователей, состоянии систем, ошибках. К сожалению, доступ к большим объёмам реальных логов часто ограничен из-за требований безопасности, конфиденциальности, неполноты данных или отсутствия сбалансированных выборок, особенно когда речь идёт о редких и аномальных событиях.

Создание инструментов генерации синтетических данных позволяет обойти все эти ограничения. Подобные инструменты дают возможность воспроизводить реалистичные, логически связанные и разнообразные сценарии поведения систем. Синтетические логи могут использоваться для тестирования и анализа систем, а также проведения имитационных моделирований возможных инцидентов.

Анализ проблемы. Для генерации искусственных данных активно используются нейросетевые технологии, а именно, генеративно-состязательные сети (GAN) и рекуррентные нейронные сети (LSTM).

Генеративно-состязательная сеть состоит из генератора (модели, которая синтезирует данные) и дискриминатора (модели, которая пытается отличить сгенерированные данные от настоящих), соревнующихся друг с другом и подстраивающих свои параметры таким образом, чтобы на выходе получались наиболее реалистичные данные. К достоинствам GAN сетей можно отнести способность выявлять сложные взаимосвязи и разнообразие получаемых на выходе данных [4].

В рекуррентных сетях, нейроны кроме прямых связей от слоя к слою имеют перекрестные или обратные связи, что позволяет анализировать последовательности данных, в которых важен порядок значений. Таким образом, рекуррентные сети, в частности LSTM, хорошо справляются с анализом последовательностей, в которых важно учитывать взаимосвязи событий во времени (к таким последовательностям относятся логи) [5, 6].

Однако, у рассматриваемых нейросетевых архитектур есть свои недостатки. Например, GAN сети могут генерировать данные, которые выглядят реалистично, но не всегда точно передают смысл исходных данных, а возможности рекуррентных нейронных сетей ограничены в тех случаях, когда требуется обрабатывать сложные многомерные данные с большим числом зависимостей.

Сочетание LSTM и GAN архитектур может значительно повысить качество и разнообразие создаваемых данных, эффективно учитывая временные и последовательные взаимосвязи.

Разработка нейронной сети. В данной работе выполнена реализация комбинированного подхода, основанного на совместном использовании рекуррентных и генеративно-состязательных нейросетевых архитектур для моделирования и анализа сценариев поведения информационной системы. В качестве исходных данных использованы записи журнала событий с временными метками, включающие входы пользователей, ошибки системы/приложений, сетевые соединения и запросы к базам данных.

Для решения задачи были выбраны следующие технологии: язык программирования Python, библиотеки Pandas, NumPy и Scikit-learn, фреймворки TensorFlow, Keras и PyTorch.

Общая схема разработанного решения представлена на рисунке 1.

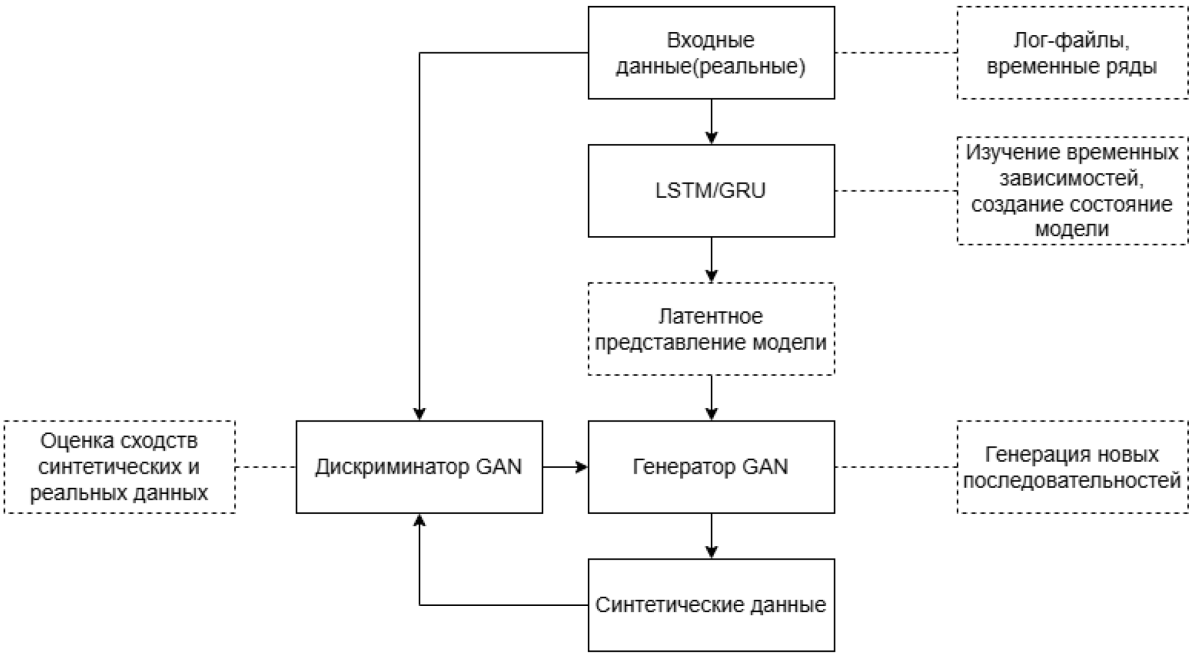


Рис. 1 – Схема решения, основанного на совместном использовании LSTM и GAN архитектур

Перед обучением нейросетевых моделей, данные прошли предобработку: очистку и нормализацию. Для выделения последовательностей использовался метод скользящего окна, формирующий временные ряды длиной 10 записей [1]. Масштабирование признаков осуществлялось с помощью метода MinMaxScaler из библиотеки Scikit-learn [2].

Разработанная архитектура состоит из пяти слоев: входной и выходной слои из 50 нейронов (запись лога состоит из пяти признаков, длинна записи равна 10 значений), слой LSTM (64 нейрона, функция активации relu), генератор GAN модели (128 нейронов), дискриминатор GAN модели (128 нейронов). Архитектура представлена на рисунке 2.

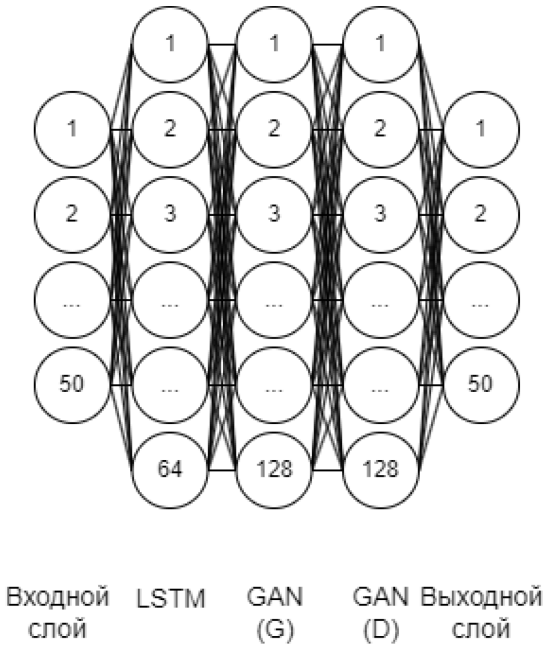


Рис. 2 – Архитектура нейронной сети

На первом этапе была обучена модель LSTM для выявления закономерностей во времени и предсказания будущих событий. Обучение происходило в течении 10 эпох, использована функция активации tanh и оптимизатор sgd.

Для оценки точности прогнозирования последовательностей использовались метрики MAE и MSE. Полученные значения метрик показали, что точность прогнозирования крайне мала: потери MSE составили 0.021, а средняя абсолютная ошибка MAE — 0.015. После анализа полученных результатов была выявлена проблема затухания градиентов при обучении нейронной сети. Чтобы исправить проблему, была использована техника регуляризации Dropout для уменьшения переобучения, увеличено число нейронов в LSTM слое с 64 до 128, функция активации изменена с tanh на relu, добавлен полносвязный слой Dense (включающий 64 нейрона с функцией активации relu) [3]. Также изменен оптимизатор с sgd на adam, а длина последовательностей увеличена с 10 до 20 записей, что позволило учитывать более широкий контекст событий.

После доработок, потери MSE снизились на 38% до 0.013, а MAE на 40% до 0.009. Архитектура нейронной сети представлена на рисунке 3.

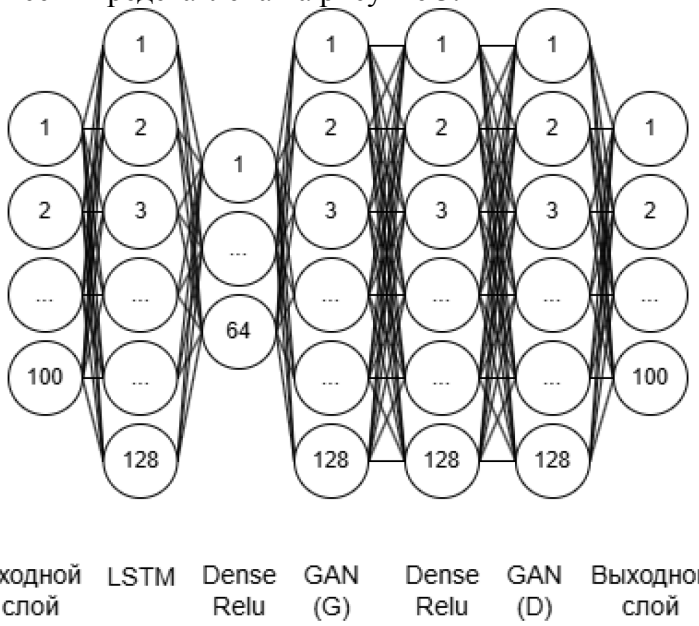


Рис. 3 – Архитектура нейронной сети после внесения изменений

GAN модель обучалась в течение 100 эпох, применяя функцию потерь Binary Cross-Entropy и оптимизатор Adam с шагом обучения 0.001. После завершения 100 эпох результаты улучшились: потери дискриминатора снизились на 40% до 0.31, потери генератора уменьшились на 36% до 0.87.

Показатель точности (метрика accuracy) дискриминатора составил 49%, что свидетельствует о том, что сгенерированные логи практически неотличимы от реальных.

Оценка качества получаемых данных после интеграции генеративно-состязательной сети показала, что количество корректных временных рядов (т.е. состоящих из логичных и взаимосвязанных между собой событий), сгенерированных сетью увеличилась на 44%. Доля редких событий в логах выросла с 2.1% до 7.8%, тем самым увеличилось разнообразие данных. Доля уникальных (неповторяющихся) записей составила 96%.

Заключение. В результате проведенного исследования было разработано нейросетевое решение с использованием архитектур LSTM и GAN для моделирования сценариев поведения информационной системы.

Разработанная нейронная сеть позволяет генерировать временные ряды, состоящие из логичных, взаимосвязанных между собой событий. При этом выходные данные достаточно реалистичны — метрика accuracy дискриминатора генеративно-состязательной сети составила 49%. Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения подхода, основанного на совместном использовании рекуррентных и генеративно-состязательных сетей для прогнозирования и исследования событий в информационных системах.

Список литературы

1. *Бахарат Р.* TensorFlow для глубокого обучения / Р. Бахарат. – СПб.: БХВ, 2020 – 256с.
2. *Ельченков Р.А., Дунаев М.Е., Зайцев К.С.* Прогнозирование временных рядов при обработке потоковых данных в реальном времени // International Journal of Open Information Technologies. 2022. Т. 10, № 6. С. 62-67.
3. *Соснин А.* Функции активации нейросети: СИГМОИДА, ЛИНЕЙНАЯ, СТУПЕНЧАТАЯ, RELU, TAHN / Соснин А.; XII международная научная-практическая конференция [г. Екатеринбург 25 февраля – 1 марта 2019] // Электронный архив РГППУ. – URL: https://elar.rsvpu.ru/. Дата публикации: 6 марта 2019.
4. *Фостер Д.* Генеративное глубокое обучение / Д. Фостер. – М.: Спринт Бук, 2024 – 448с.
5. *Худяков Д.А.* Разработка системы выявления аномалий на основе распределенной трассировки логов // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2023. Т. 21, № 1. С. 62-72. DOI 10.25205/1818-7900-2023-21-1-62-72
6. *Шелухин О.И., Шариков А.Ю.* Имитация поведения компьютерной системы с помощью искусственных нейронных сетей // T-Comm: Телекоммуникация и транспорт. 2021. Том 15. №5. С. 29-37

2.3.1.

А.В. Тарасов, В.О. Сапожников, Д.В. Жевнерчук д-р техн. наук

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт радиоэлектроники и информационных технологий,
кафедра вычислительных систем и технологий,
Нижний Новгород,alexandervtarasovddd@gmail.com,
sapozhnikov.vo@nntu.ru, zhevnerchuk@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СОПРЯЖЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ОТКРЫТЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДОМЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

В работе описанамодель сопряжения компонентов открытых информационных систем на основе представления интерфейса компонентов как комбинации алгебраического типа данных и доменных ограничений. Доменные ограничения рассматриваются как предикаты на множествах значений и могут комбинироваться с помощью логических операций. Вводится отношение частичного порядка между доменными ограничениями, позволяющее описать совместимость интерфейсов.

Ключевые слова:*доменные ограничения, открытые информационные системы, сопряжение компонентов, совместимость интерфейсов, алгебраические типы данных.*

Открытые информационные системы (ОИС)[1], представляют собой множество автономных компонентов, взаимодействующихпосредством сопряжения стандартизированных интерфейсов. Для ОИС, как правило, сопряжение интерфейсов считается возможным, если совпадают типы данных, передаваемых через выходной интерфейс одного компонента и получаемых через входной интерфейс другого. Однако, частой является ситуация, когда формально типы данных совпадают, но в силу особенностей предметной области, реальные значения данных находятся в непересекающихся диапазонах. Задача данной работы – описать механизмы, позволяющие валидировать сопряжения между компонентами на основе их доменных ограничений.

В ОИС типы данных передаваемых или получаемых компонентами может быть представлен комбинацией некоторого базового множества значений, набора доменных ограничений(ДО)[2], алгебраического типа данных (АТД)[3].При этом в качестве базовых множеств значений(БМЗ) могут быть выбраны множества примитивных типов данных, используемых в языках программирования, например,в java: byte, char, short, int, long, float, double, boolean.Под доменным ограничением в рамках работы будет пониматься предикат на БМЗ, результатом которого является подмножество базовых множеств значений.

Стоит отметить, что типы данных, связанные с интерфейсами компонентов, могут быть построены с использованием нескольких доменных ограничений, последовательно примененных к БМЗ (композиция ДО).Таким образом, ДО может применяться не только к БМЗ, но и к их подмножествам. Для описания возможных комбинаций ДОпредлагается использовать систему логических функций: отрицание(¬), конъюнкция(∧), дизъюнкция(∨).

Назовём композицию доменных ограниченийX более сильной по отношению к композиции доменных ограниченийY, если относительно пары БМЗ $s_i, s_j \in S$, к которым были применены эти *X, Y*, верно утверждение:

$$X(s_i) \Rightarrow Y(s_j),$$

то есть, результат применения ограничения Y к множестввуs_j включает в себя результат применения ограничения X к множеству s_i , при этом$s_i \subseteq s_j$.

Таким образом, сопряжение между компонентами возможно если БМЗ, связанные со входом и выходом компонентов, совпадают, а композиция ДО, примененная к БМЗ, связанном с выходным интерфейсом сильнее, чем композиция ДО, примененная к БМЗ,

связанная с входным интерфейсом.

Под простым доменным ограничением будем понимать ДО, которое не может быть представлено композицией двух и более различных ДО. Отношения между простыми доменными ограничениями могут быть выведены исходя из свойств определяемого множества, от которых зависят предикаты доменных ограничений, например, на множестве вещественных чисел, ДО $x<3$ сильнее, чем ДО $x<5$, так как отношение "<" образует строгий порядок.

Отношения между простыми и составнымидоменными ограничениями отражены на рисунке 1. Стрелками обозначено отношение "является более сильным".

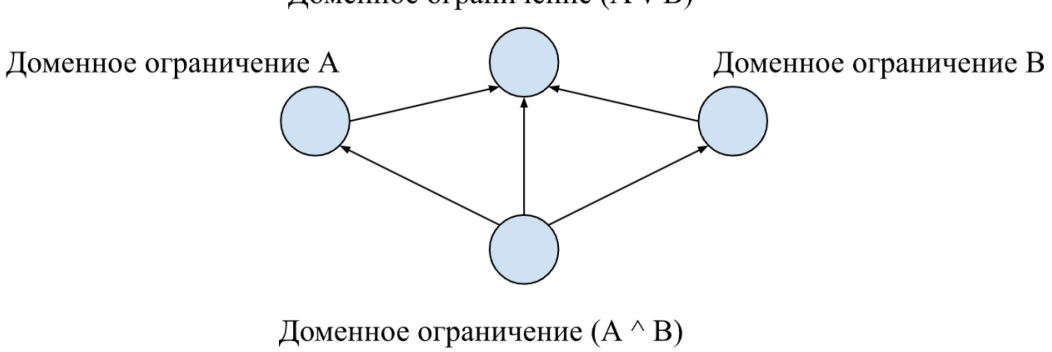


Рис. 1 – Отношения между простыми и составными доменными ограничениями

Отношение "является более сильным" - транзитивно и рефлексивно:

$$\forall t \in T: t\ R\ t$$

$$\forall x, y, x \in T: (x\ R\ y, y\ R\ z) \Rightarrow x\ R\ z,$$

где T - множество предикатов,

R - отношение "является более сильным".

Базовые типы данных ограничены, как правило, в силу технической природы вычислительных устройств, например, максимальные и минимальные значения числовых типов: *int*, *long*, *float*, *double*. Несмотря на то, что эти ограничения не определяются предметной областью, они также являются предикатами над множеством значений с бóльшим количеством элементов, например, *int* является подмножеством целых чисел, а *float* - вещественных. Таким образом, ограничения такого рода могут обрабатываться так же как и ДО, определяемые особенностями предметных областей. Такой подход позволит сопрягать интерфейсы в случаях, когда формально типы разные, но ДО и ограничения базового типа накладываются на одно и тоже исходное множество, а совокупное ограничение, связанное с выходом, является более сильным чем совокупное ограничение, связанное со входом.

Отметим, что такой подход обеспечивает возможность сопряжениякомпонентов, интерфейсы которых связаны с ограничениями описываемыми различными спецификациями БМЗ, (например, тип *int* может иметь различную разрядность) если исходные БМЗ, на которые накладываются ограничения, совпадает.

Доменные ограничения, применяемые к алгебраическим типам данных, могут:

1. Зависеть от нескольких типов в составе алгебраического и, соответственно, применяться к АТД целиком или подмножеству его составляющих типов, аналогично случаю применения ДО к БМЗ.
2. Быть суммой ограничений, накладываемых отдельно на каждый тип данных в составе АТД.

Доменные ограничения на входном и выходном типе могут находится в следующих вариантах отношений:

1. ДО на входе сильнее чем ДО на выходе (Рис. 2а) или ДО на выходе не сильнее чем ДО на входе, при этом у ДО на выходе и входе существуют пересечения (Рис. 2б) - сопряжение компонентов возможно, но часть значений, передаваемых предыдущим компонентом, не соответствует ДО последующего компонента.

2. ДО на выходе сильнее чем ДО на входе (Рис. 2г) - при сопряжении компонентов гарантируется корректность передаваемых значений с точки зрения ДО.
3. ДО на выходе и ДО на входе не пересекаются (Рис. 2в) - сопряжение невозможно.
4.

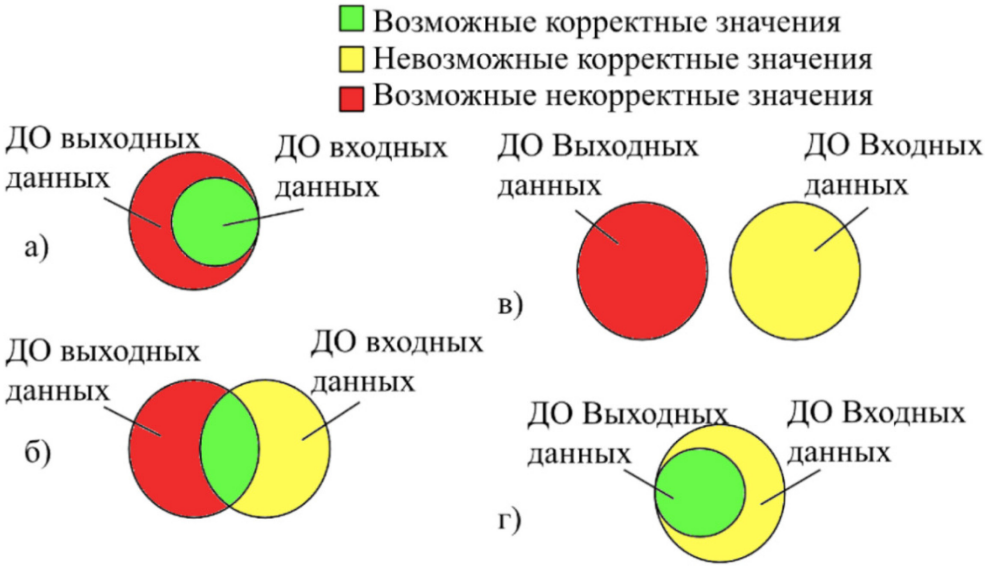


Рис. 2 – Диаграммы описывающие отношения между доменными ограничениями

Рассмотрим компоненты подсистемыв составе АСУ ТП, применяемую в задаче мониторинга характеристик сигналов, поступающих с датчиков:

– сигналы, поступающие в систему из внешней среды;
– визуальные элементы отображения - элементы графических нотаций для визуализации сигналов, поступающих от датчиков либо имитаторов (табло, индикаторы и т.п.);
– видеокадры [4].

В текущих реалиях видеокадры формируются экспертами. С учетом заданных ограничений эксперт самостоятельно подбирает необходимый графический элемент из всего доступного множества визуальных элементов отображения. Рассматриваемый в данной работе подход позволяет сократить множество графических элементов, доступных для выбора с учетом поддерживаемых ими режимов визуализации.

Рассмотрим упрощенную модель системы, в рамках которой:

1. Генерируемый сигнал может представлять собой целое число, дробное число и строку при этом, числа ограничены диапазоном измерения датчика, строки - максимальным размером.
2. Для каждого сигнала существует требования к возможнымграфическим элементам: возможность отображать только значение, отображатьзначение и уставку, учитывать точность при отображении.
3. Для каждого визуального элемента определён тип отображаемого значения: целое/дробное число или строка, задано количество символов и требуемая точность, возможность отображать уставку.

На основе данного описания ДОвходного интерфейса визуальных элементов могут быть формализованы следующим образом:

1. Количество символов для отображения целочисленного значения:

$$10^n > x > -10^{n-1}$$

где x - аргумент предиката (БМЗ – множество целых чисел),
n - количество отображаемых символов.

2. Количество символов для отображения дробного значения с требуемой точностью:

$$m < n;\ 10^{n-m} > x\ > -10^{n-m-1}$$

где x - аргумент предиката (БМЗ – множество чисел с плавающей запятой),

n - количество отображаемых символов,

m - требуемое количество символов после запятой.

3. Количество символов в строке:

$$n \geq length(x) \geq 0,$$

где x - аргумент предиката (БМЗ – множество строк),

n - количество отображаемых символов,

length(x) - функция вычисления длины строки.

Введённое отношение частичного порядка между ДО делает возможным автоматизированный анализ корректности сопряжения компонентов на уровне ограничений, накладываемых на интерфейсы. Полученные результаты могут быть использованы в задачах синтеза многокомпонентных информационных систем.

Список литературы

1. *Петров В.Н.* Информационные системы: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2002. – 688 с.

2. *Смирнов Ю.А.* Понятие домена и доменные ограничения в реляционных СУБД // Базы данных: теория и практика. – 2022. – № 4. – С. 12–17.

3. *Душкин Р.* Алгебраические типы данных и их использование в программировании // Практика функционального программирования, выпуск 2. – 2009. – URL: https://fprog.ru/2009/issue2/roman-dushkin-algebraic-data-types/ (Дата проверки: 09.07.2025)

4. *Елизаров И.А.* Интегрированные системы проектирования и управления: SCADA-системы // И.А. Елизаров, А.А. Третьяков, А.Н. Пчелинцев/ Тамбов: Изд-во ТГТУ. – 2015. – 160 с.

2.3.1.

С.А. Тихонов, А.А. Львов д-р техн. наук

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
кафедра Прикладные информационные технологии,
Саратов, tikhonoffsergey@gmail.com, alvova@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ СЕТЕВОГО ТРАНСПОРТА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ С ПРЕРЫВИСТЫМ СОЕДИНЕНИЕМ

В работе представлен результаты анализа сквозного и пошагового методов передачи данных при фиксированном коэффициенте потерь. Используемая при анализе модель модифицирована путем применения метода потерь на основе двухпозиционной дискретно-временной цепи Маркова.

Ключевые слова: *маршрутизация, беспроводная сенсорная сеть, протокол, транспортный метод, прерывание, цепь Маркова.*

В беспроводной среде с прерывистой связью периоды прерывания не фиксирован и период прерывания может быть разной продолжительности. Следовательно, необходима модель потерь, учитывающая длительность периода прерывания. В работе [1] описана модель потерь Бернулли (Bernoulli loss model). Решено использовать модель потерь Бернулли и смоделировать потерю пакетов при помощи смены состояний «доступен/недоступен», демонстрирующую длительность периода потери связи. В рамках данной модели потерь рассматривается взаимодействие одной пары отправитель-получатель, соединенной транзитным способом.

После сравнения методов в условиях постоянных (с течением времени) интервалов ретрансляции, пошаговый метод рассмотрен в условиях экспоненциального распределения интервалов ретрансляции [2]. Данный подход дает возможность регулирования интервалов ретрансляции. Стратегия экспоненциального распределения широко используется, например, протоколом TCP.

Произведен анализ двух транспортных методов передачи данных в рамках базовых моделей сети с использованием расчета потерь при соединении. В качестве модели предложена одноранговая сеть из H переходов и одной пары источник-получатель. С каждым переходом между узлами i связан параметр потерь Бернулли q_i. В случае сбоя при передаче пакет повторно передается до L - 1 раз. В зависимости от метода сетевого транспорта инициатором повторной передачи являются разные члены сети: при сквозном методе повторная передача осуществляется изначальным узлом-источником, при пошаговом методе – узлом, при передаче от которого произошел сбой. Вероятность успеха при передаче и ожидаемое количество необходимых для успеха передач по каналу связи обозначим функциями H и L.

На рис. демонстрируются результаты моделирования описанных параметров в рамках одноранговой сети из пяти узлов с максимальным количеством попыток передачи L=7 и L=15 и $q_i = q$, $\forall i$, $1 \le i \le H$. Из рис. 1 следует, что с некоррелированными потерями, составляющими всего несколько процентов, хорошо справляются оба принципа управления транспортом. По мере увеличения вероятности потери связи q обе схемы постепенно деградируют, но при сквозном методе коэффициент доставки передачи падает быстрее. Увеличение количества передач приводит к увеличению коэффициента доставки при высоких вероятностях потерь. Пошаговый принцип превосходит по эффективности сквозной принцип при любом из выбранных значений L и при любом коэффициенте потерь q. Более того, преимущество пошагового метода выражается в меньшем количестве передач, что

показано на рис. 2. Отметим повышение количества попыток при большом коэффициенте потерь $q > 0,5$ при передаче пошаговым методом, что необходимо для достижения ненулевой вероятности доставки пакетов. Сквозной метод при аналогичном значении коэффициента потерь теряет шанс на успешную доставку пакета.

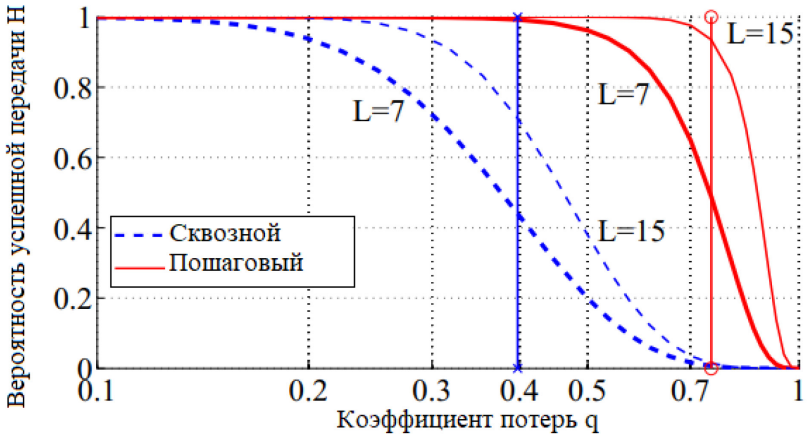


Рис. 1 – Вероятность успешной доставки пакета с учетом коэффициента потерь Бернулли

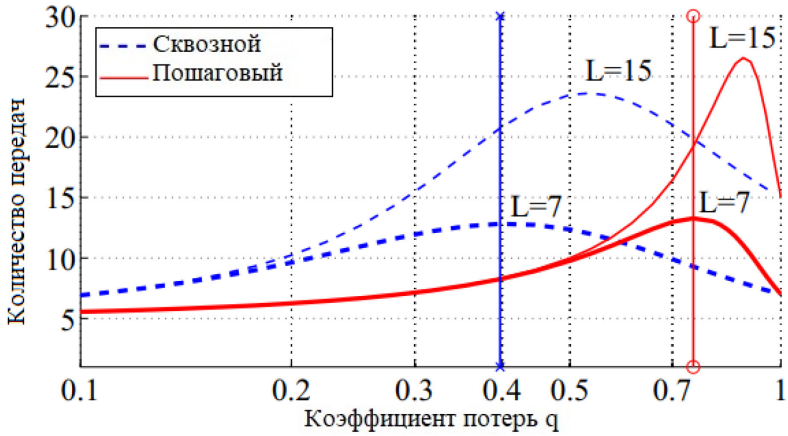


Рис. 2 – Количество передач с учетом коэффициента потерь Бернулли

Таким образом, при использовании в расчетах модели потерь пакетов Бернулли передача пошаговым принципом демонстрирует лучший результат с точки зрения эффективности передачи по каналам связи и обеспечения наивысшей вероятности успешной доставки при любой вероятности потери $q \in [0,1]$. Однако, при прерывистом соединении потери пакетов коррелируют. Далее исследуется относительная производительность протоколов на модели, подходящей для сценариев с прерывистым соединением, с учетом реальных политик передачи данных транспортных протоколов.

Используемые ранее в работе топологии представляли из себя одноранговые сети с конечным числом беспроводных переходов для передачи данных, H. Состояние соединения каждого перехода моделируется двухпозиционной дискретно-временной цепью Маркова (discrete-time Markov chain, DTMC, ДМЦ) [3], чередующейся между двумя состояниями: «хорошим» или «включенным», в котором передача пакетов проходит успешно, и «плохим» или «выключенным», в котором связь между двумя конечными точками переходов потеряна. Изменение состояния для каждого перехода i происходит на дискретных временных шагах, равных времени передачи пакета, с вероятностью $p_{gb}(i)$ и $p_{bg}(i)$, соответственно. Вероятности $p_{gg}(i) := 1 - p_{gb}(i)$, $p_{bb}(i) := 1 - p_{bg}(i)$ обозначают вероятность отсутствия перехода между состояниями, как показано на рис. 3.

По сравнению с моделью Бернулли, предлагаемая модель потерь позволяет учесть корреляции в процессе потерь, которые часто встречаются в беспроводных каналах связи.

Также, данная модель может рассматриваться как простая модель для прерывания связи.

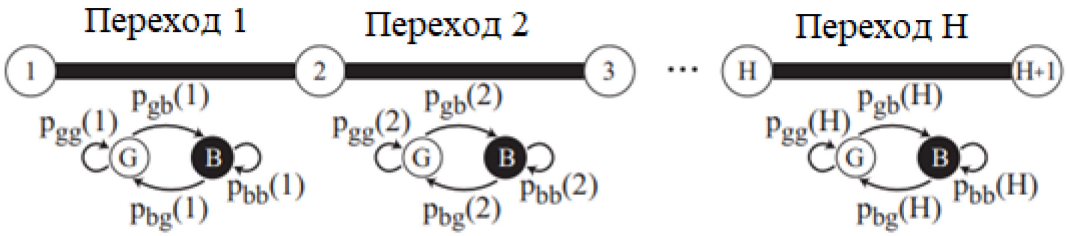


Рис. 3 – Модель потерь

В контексте данной работы игнорируется зависимость между последовательными переходами. Состояние канала связи на каждом переходе меняется независимо от состояния других переходов. Для двухпозиционной дискретно-временной цепи Маркова ожидаемая продолжительность двух состояний задается как

$$E_B^i = \frac{1}{p_{bg}(i)}, \qquad E_G^i = \frac{1}{p_{gb}(i)}; \tag{1}$$

вероятности устойчивого состояния состояний задаются

$$P_B^i = \frac{p_{gb}(i)}{p_{bg}(i) + \mathrm{p}_{gb}(i)}, \qquad P_G^i = \frac{p_{bg}(i)}{p_{gb}(i) + \mathrm{p}_{bg}(i)}; \tag{2}$$

и средний коэффициент потерь q^i на i^{th} переходе определяется как

$$q^i := P_B^i \tag{3}$$

Также, матрица вероятностей перехода состояния связи для i шага имеет вид:

$$P_i = \begin{pmatrix} p_{bb}(i) & p_{bg}(i) \\ p_{gb}(i) & p_{gg}(i) \end{pmatrix} \tag{4}$$

вероятности k-шагового перехода являются элементами матрицы $P_i^{(k)}$, определяемой как

$$P^{(k)}{}_i := \begin{pmatrix} p^{(k)}{}_{bb}(i) & p^{(k)}{}_{bg}(i) \\ p^{(k)}{}_{gb}(i) & p^{(k)}{}_{gg}(i) \end{pmatrix} := (P_i)^k \tag{5}$$

с элементами $p_{gb}^{(k)}(i)$ и $p_{bg}^{(k)}(i)$, $1 \le i \le H$, обозначающими вероятности перехода между состояниями за k шагов эволюции ДМЦ.

Процесс, представленный матрицей вероятностей перехода P_i, положительно коррелирован, если $P_B^i < p_{bb}(i) = 1 - \mathrm{p}_{bg}(i) + p_{gb}(i) < 1$. Значит, условная вероятность того, что на следующем шаге состояние перехода станет «выключен» (при условии, что текущее состояние - „выключен“), выше, чем устойчивая вероятность нахождения в состоянии «выключено».

Корреляция процесса равна нулю, когда вероятность перехода во включенное или выключенное состояние не зависит от текущего состояния. Такой вариант применим к ситуации, когда $p_{bg}(i) = p_{gg}(i) \Leftrightarrow p_{gb}(i) = p_{bb}(i)$, что эквивалентно $p_{bg}(i) + p_{gb}(i) = 1$. Используя определения $E[B]$ и q из (1) и (3), соответственно, длительность прерывания $E[B]$, при которой модель потерь при включении/выключении имеет нулевую корреляцию и, таким образом, ведет себя как модель Бернулли, равна $E[B] = 1/(1-q)$.

Наконец, процесс называется отрицательно коррелированным, когда $E[B] < 1/(1-q)$. Если канал находится в выключенном состоянии, то в следующем временном слоте он с большей вероятностью окажется во включенном состоянии $p_{bg}(i) > p_{bb}(i)$ и наоборот для канала, находящегося во включенном состоянии.

Количество передач является конечным и ограничено L как для сквозной, так и для пошагового транспортных принципов. Для сквозного метода L - число попыток, предпринятых узлом-источником. Для пошагового метода - число попыток, предпринятых источником и каждым из промежуточных узлов. Следовательно, максимальное количество передач по каналу связи в обоих случаях ограничено одним и тем же числом $H \cdot L$. Для сквозного транспорта максимальное число попыток достигается, если пакет успешно проходит первые H-1 переходов, а затем терпит неудачу на переходе H. Для пошагового транспорта число передач расходуется, если на каждом переходе пакет терпит неудачу в первых L-1 попытках передачи, но достигает успеха на L попытке передачи.

В большинстве реальных сетевых протоколов, предусматривающих повторную передачу данных, используется тот или иной алгоритм выдержки (*back-off algorithm*), обычно экспоненциальный, для распределения повторных попыток передач во времени. Для исследуемых в работе транспортных методов может применяться любая политика ретрансляции. Мы используем $rto(k)$ для обозначения задержки перед повторной передачей (*retransmission timeout*, RTO) между k и $k+1$ попытками передачи, $1 \le k \le L-1$. После k неудачной попытки передачи узел, осуществляющий повторную передачу, ждет $rto(k)$ временных интервалов, прежде чем начать следующую попытку передачи.

Для каждого из исследуемых транспортных принципов выведено два параметра для одноранговой топологии с H переходами: вероятность успешной доставки пакета $P_D^e(h)$, и ожидаемое количество попыток передачи по каналу $E[\mathrm{T}_x \mathrm{e}^h]$ для каждого пакета. Заметим, что для $L=1$ существует только одна попытка передачи и нет повторных передач. Таким образом, обе схемы ведут себя одинаково. Вероятность успешной доставки задается как $P_D = \prod_{i=1}^{H} P_G^i$, а ожидаемое число передач в виде $E[\mathrm{T}_x] = \sum_{i=1}^{H-1} i \cdot (1-P_G^i) \prod_{k=1}^{i-1} P_G^k + H \cdot \prod_{k=1}^{H-1} P_G^k$. В дальнейших расчетах предполагается, что разрешена по крайней мере одна повторная передача, $L \ge 2$. Описанная модель учитывает периоды подключения и отключения с помощью процесса потерь с двумя состояниями.

Список литературы

1. *Heimlicher S., Nuggehalli P., May M.* End-to-end vs. Hop-by-hop Transport // ACM SIGMETRICS ’07 Student Workshop, San Diego, CA, June 2007.

2. *Ba Surra, S.* Collision Guided Routing for Ad-Hoc Mobile Wireless Networks / S. Ba Surra. – PhD thesis. – Somerset, UK: University of Bath, 2013 – P.143.

3. Полумарковская модель телекоммуникационной сети с динамическим управлением / Д.А. Мищенко, А.А. Львов, М.С. Светлов и др. // Известия ЮФУ. Технические науки, 2021. – № 5. – С. 49-60.

2.3.1.

Е.Ф. Трофимова, В.И. Полуничев д-р техн. наук

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки»,
liza.trofimova2016@yandex.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПАССИВНЫХ СИСТЕМ АВАРИЙНОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ОТВОДОМ ТЕПЛА К АТМОСФЕРНОМУ ВОЗДУХУ

В статье представлен краткий анализ характерных вариантов пассивных систем аварийного расхолаживания отечественных и зарубежных реакторных установок с водным и натриевым теплоносителем с использованием в качестве охлаждающей среды атмосферного воздуха. Рассмотрены варианты с отводом тепла от парогенераторов непосредственно атмосферным воздухом, водяными и воздушными теплообменниками, теплоотводом воздухом от защитной оболочки.

В результате проведенного сравнительного анализа выявлены принципиальные особенности, характеризующие основные достоинства и недостатки рассмотренных вариантов систем как по надежности, так и по практической реализации.

Ключевые слова: *водный и натриевый теплоноситель, система аварийного расхолаживания, воздушный теплообменник, защитная оболочка, пассивный теплоотвод, естественная циркуляция.*

Повышение уровня безопасности является приоритетным направлением развития ядерных энергетических установок. Одной из задач по повышению безопасности АЭС является обеспечение надежного отвода остаточных тепловыделений в реакторе в аварийных ситуациях, в том числе при неработающих штатных средствах теплоотвода, например, при полном обесточивании установки. Основным путем решения данной задачи в мировой практике является разработка и использование надежных пассивных систем аварийного расхолаживания, не требующих для своего функционирования внешней энергии. Данная статья посвящена, в основном, анализу основных проектных решений пассивных систем аварийного расхолаживания действующих и строящихся АЭС, результаты которого целесообразно учитывать при проектировании перспективных реакторных установок типа ВВЭР, АЭС с натриевым теплоносителем.

В нормативных документах сформулированы достаточно жесткие требования к системам безопасности, в том числе к системам теплоотвода. В частности, указано, что предпочтение должно отдаваться системам, устройство которых основано на пассивном принципе действия.

Система пассивного отвода тепла атомной электростанции АЭС-2006 (Россия)

Схема системы приведена на рисунке 1. Она состоит из 4-х независимых контуров по одному на каждую петлю реакторной установки. Каждый контур включает: два теплообменных модуля; тракт воздуховодов; воздушные затворы; регулирующие устройства. Воздуховоды заканчиваются общим коллектором – дефлектором. До и после каждого теплообменного модуля предусмотрены воздушные затворы. При расчетном обосновании и экспериментальных исследованиях системы выявлена гидродинамическая неустойчивость работы системы [1]. Для ее исключения в воздуховоде над теплообменником был установлен шибер с регулирующим устройством прямого действия, работающим в пассивном режиме от давления пара в парогенераторе [2]. При разработке СПОТ для АЭС-2006 выполнен большой объем расчетных и экспериментальных исследований, в том числе полномасштабных, подтвердивших ее надежную работу. Система обладает существенным достоинством –

возможностью бесконечного устойчивого пассивного отвода тепла в режиме пассивного саморегулирования.

Вместе с тем, система имеет и ряд особенностей: большие габариты воздушного тракта и размещение его за пределами защитной оболочки, при этом имеется потенциальная возможность замерзания конденсата при отрицательных температурах воздуха и разрушения от внешних воздействий.

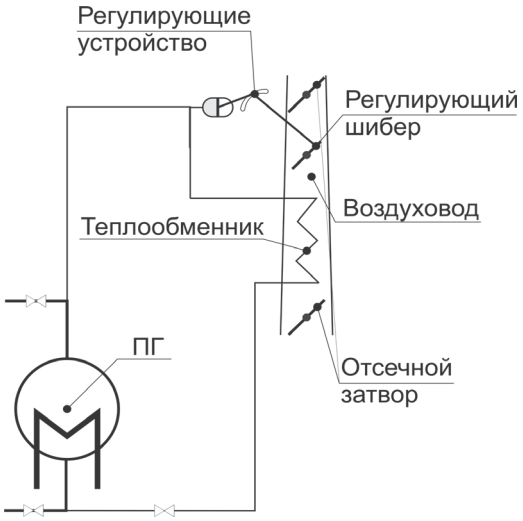


Рис. 1 - Принципиальная схема системы пассивного отвода тепла АЭС2006

Пассивная САР реакторной установки АР-1000 (США)

Принципиальная схема пассивной системы отвода тепла АР1000 приведена на рисунке 2.

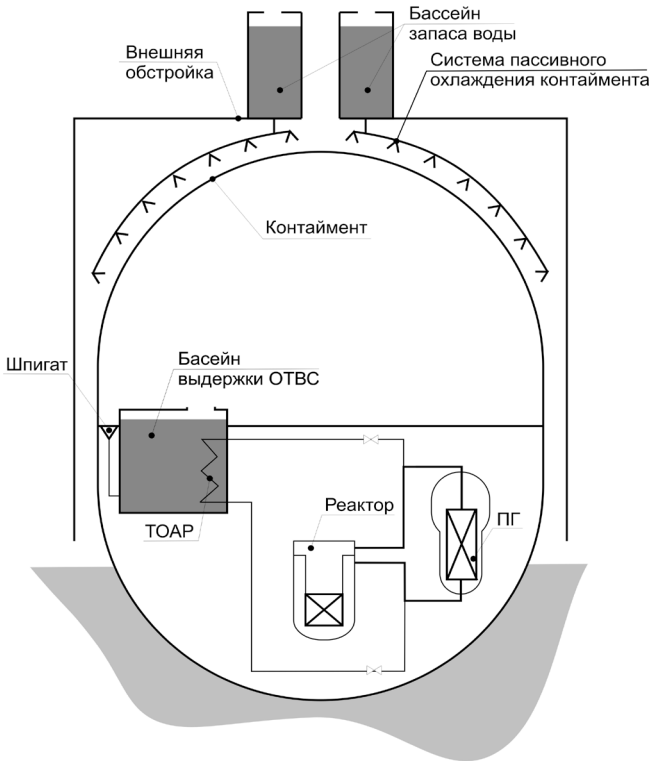


Рис. 2 – Принципиальная схема пассивного отвода тепла АР1000

Особенностью САР АР-1000 является использование в качестве охлаждающей среды воды бассейна выдержки, пар которой конденсируется на стенках ЗО, охлаждаемой водой орошения, а конденсат стекает в бассейн, находящийся в защитной оболочке [3].

Достоинствами системы являются надежный отвод тепла от реактора в начале аварии водой бассейна-хранилища даже при разрушении бассейна запаса воды и воздушного тракта достаточно длительное время. В нормальном состоянии система обеспечивает отвод тепла в течение 72 ч.

В качестве недостатков необходимо отметить ограниченное время функционирования; размещение части системы за пределами защитной оболочки; зависимость мощности от параметров окружающего воздуха.

Система аварийного расхолаживания CEFR (Китай)

Принципиальная схема системы аварийного расхолаживания показана на Рисунке 1.

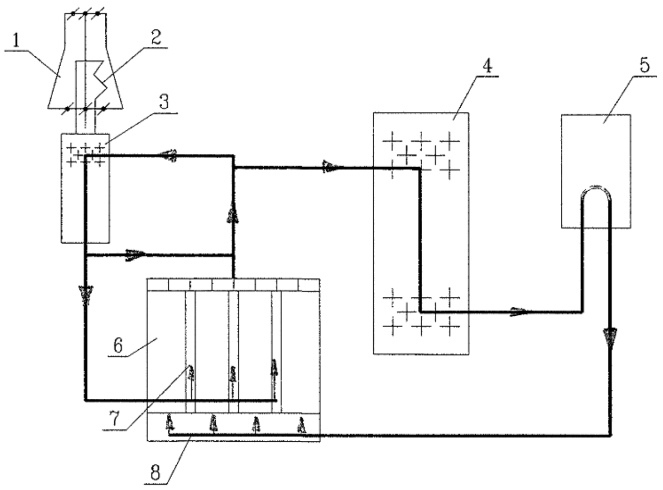


Рис. 3 – Схема циркуляции натрия первого контура
1 – Труба вытяжная; 2 – ВТО; 3 – АТО; 4 – Промежуточный теплообменник; 5 – Насос первого контура; 6 – Тепловыделяющая сборка; 7 – Пространство между тепловыделяющими сборками; 8 – Напорная камера.

Естественная циркуляция теплоносителя обеспечивается за счет охлаждения натрия первого контура в межтрубном пространстве автономного теплообменника (АТО) натрием промежуточного контура, циркулирующим внутри трубок. Далее тепло передается через воздушные теплообменники в атмосферу. Все составные части САРХ расположены в контейнменте реактора и боксах ВТО, рассчитанные на восприятие нагрузок в случае землетрясения или ударной волны.

Для обеспечения надежности САРХ реализованы следующие технические решения: многоканальность; секционирование воздушных теплообменников; автоматический перевод каналов САРХ в режим расхолаживания, исключающий ошибку персонала [4].

Система аварийного расхолаживания БН-800 (Россия)

Реактор БН-800 эксплуатируется на Белоярской АЭС. В его состав входит система аварийного расхолаживания с шестью воздушными теплообменниками, подключенными ко второму контуру реакторной установки. Схема системы показана на Рисунке 3 [4].

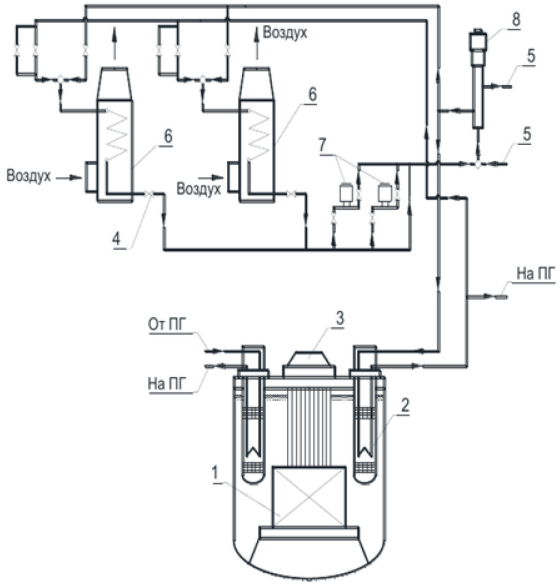


Рис. 4 – Схема системы аварийного расхолаживания реактора БН-800

1 – Активная зона; 2 – Промежуточный теплообменник; 3 – СУЗ; 4 – Обратный клапан; 5 – Второй контур; 6 – Воздушный теплообменник; 7 – Электромагнитные насосы; 8 – ГЦН-2.

Аварийный отвод тепла от реактора осуществляется через промежуточные теплообменники к воздушным теплообменникам (ВТО), затем к атмосферному воздуху благодаря принудительной циркуляции натрия первого и второго контуров и естественной циркуляции воздуха через ВТО.

В случае аварий с потерей электроснабжения или множественных отказах в каналах САРХ отвод тепла от реактора будет осуществлен с помощью одного воздушного теплообменника. Для предотвращения замораживания натрия в случае отказа ВТО объем воздуха подогревается электронагревателями.

Заключение

Приведенная в статье информация не является исчерпывающей, но полезной, чтобы принимать во внимание достоинства и недостатки рассмотренных систем при проектировании перспективных реакторных установок типа ВВЭР, БН и АСММ.

Список литературы

1. *Полуничев В.И, Шумайлов Г.П., Горностаев Д.А.* «Обеспечение устойчивой работы системы пассивного отвода тепла АЭС нового поколения» Журнал "Теплоэнергетика". 2005г. №12. Стр.50-54.

2. *Шумайлов Г.П., Горбунов П.А., Григорьев М.М., Плаксеев А.А. Полуничев В.И., Таранов Г.С.* «Создание и исследование регулирующего устройства системы пассивного отвода тепла для АЭС "Куданкулам"». "Атомная энергия", т.102, Вып. 1, 2007 с. 49-52

3. PASSIVE SAFETY SYSTEMS AND NATURAL CIRCULATION IN WATER COOLED NUCLEAR POVER PLANTS. IAEA-TECDOC-1624. ISBN978-92-0111309-2, ISSN 1011-4289. IAEA. VIENA, 2009.

4. *Морозов А.В., Ремизов О.В., Маслов Ю.А., Харитонов В.С.* «Схемные решения и принципы работы пассивных систем аварийного охлаждения различных типов ЯЭУ»: Учебное пособие / М.: НИЯУ МИФИ, 2015. с. 101; с. 111.

2.3.1.

[1]А.Н. Хайбуллин, [2]С.А. Абашина, [2]В.В. Бронская, [2]К.В. Саерова, [2]А.Р. Хайруллина, [2]А.И. Шагеева, [2,3]А.У. Аетов

[1]Казанский (Приволжский) федеральный университет,
[2]Казанский национальный исследовательский технологический университет,
[3]Казанский государственный аграрный университет,
Казань, aetovalmaz@mail.ru

МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ В ИССЛЕДОВАНИИ ФИНАНСОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КРУПНЫХ КОМПАНИЙ

В исследовании проведен комплексный анализ набора данных Fortune 1000, содержащего информацию о крупнейших компаниях США. Основное внимание уделено изучению взаимосвязей между ключевыми финансовыми показателями (выручка, прибыль, численность персонала), расчету показателя эффективности (ROS), сравнительному анализу эффективности по отраслям и оценке вариации внутри секторов. Использованы методы корреляционного анализа, визуализации данных, статистического тестирования и расчета коэффициента вариации. Результаты выявили значимые различия в эффективности между секторами и неоднородность внутри них. Обозначены перспективы разработки прогнозных моделей и алгоритмов детекции аномалий.

Ключевые слова: *Fortune 1000, экономические показатели, корреляционный анализ, рентабельность продаж, отраслевой анализ, прогнозирование прибыли.*

Рейтинг Fortune 1000 представляет собой систематизированную базу данных о крупнейших американских компаниях, ранжированных по величине годовой выручки. Анализ взаимозависимостей их экономических показателей и сравнительная оценка эффективности деятельности имеют существенное значение для понимания рыночных тенденций и отраслевых особенностей. Данное исследование ставит целью выявление статистических закономерностей между ключевыми метриками (выручка, прибыль, численность сотрудников), количественную оценку эффективности компаний через показатель рентабельности продаж (ROS), а также сравнительный анализ этого показателя по отраслям с проверкой статистических гипотез и оценкой внутриотраслевой вариабельности. Источником данных была использована база данных fortune1000 с платформы Kaggle, содержащая актуальную информацию на момент публикации данные о компаниях, входящих в список Fortune 1000. В ходе работы было сделано распределение компаний по секторам. Предобработка данных происходила за счет преобразования столбцов Revenue, Profits и Employees к числовому формату и удаления строк с пропущенными значениями (NA) в указанных ключевых столбцах для обеспечения корректности расчетов. Аналитический метод обработки данных включал в себя проведение корреляционного анализа. Были рассчитаны матрицы парных коэффициентов корреляции Пирсона между переменными Revenue, Profits и Employees. Визуализация результатов с использованием тепловой карты (heatmap) представлена на рисунке 1.

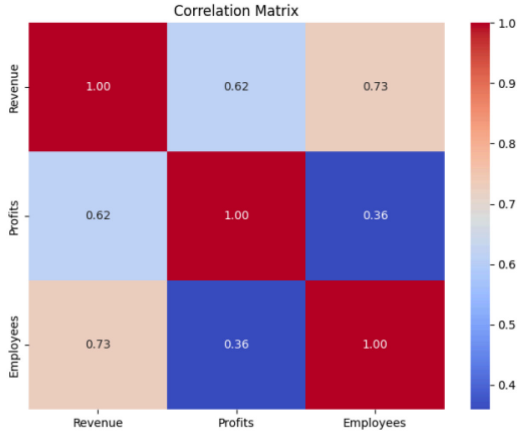


Рис. 1 – Тепловая карта корреляционной матрицы

Также исходя из рейтингов компаний (рис. 2) был произведен расчет показателя эффективности (ROS) для каждой компании и проведено ранжирование, представленное на рисунке 3, т.е. составление рейтинга ТОП-10 компаний по величине ROS. Отраслевой анализ осуществлялся группировкой компаний по секторам, проводился расчет среднего значения ROS для каждого сектора и визуализировалось среднее значение ROS по секторам с помощью столбчатой диаграммы.

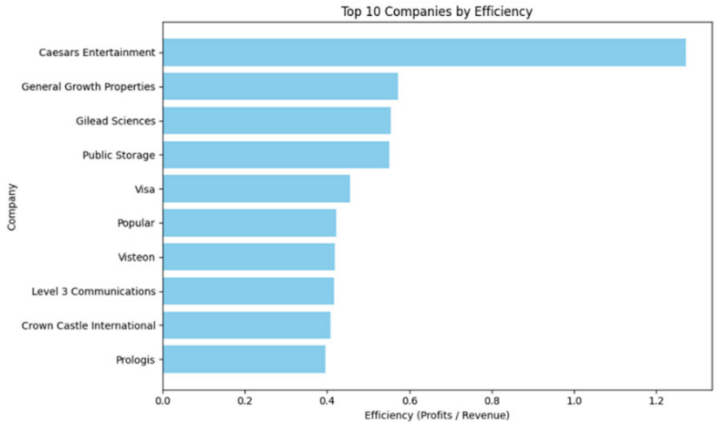


Рис. 2 – Рейтинг ТОП-10 компаний по рентабельности продаж

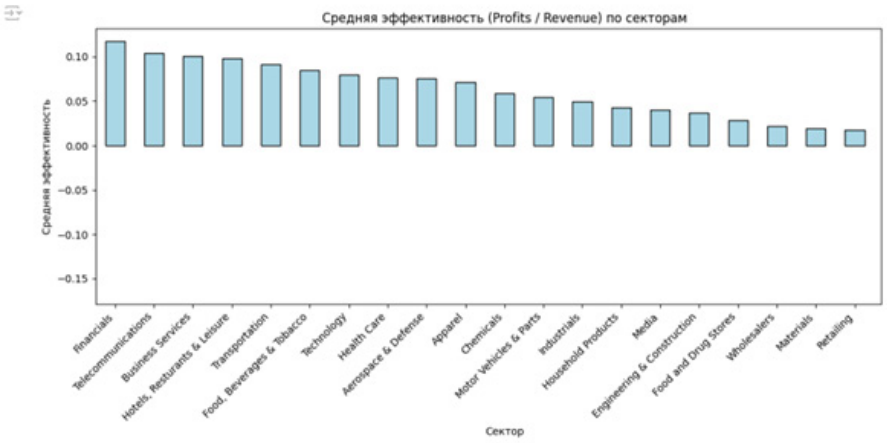


Рис. 3 – Средний ROS по секторам

Для проверки гипотезы о значимых межсекторальных различиях в средней рентабельности продаж (ROS) использован двухвыборочный t-критерий Стьюдента с поправкой Уэлча. Нулевая гипотеза (H_0: $\mu_1 = \mu_2$) об отсутствии различий отвергнута в пользу альтернативной (H_1: $\mu_1 \neq \mu_2$) на основе анализа секторов "Technology" (n=102) и "Energy" (n=122). Выявлено статистически значимое различие средних ROS (t=4,89; p<0,0001; α=0,05), подтверждающее систематические различия в эффективности. Применение критерия Уэлча

обосновано гетероскедастичностью. Для количественной оценки степени неоднородности эффективности компаний внутри отраслевых сегментов был применен метод расчета коэффициента вариации (Coefficient of Variation, CV).

Коэффициент вариации позволяет стандартизировать оценку разброса значений относительно среднего уровня, обеспечивая сопоставимость между секторами с различными абсолютными значениями рентабельности. Результаты расчетов демонстрируют существенную дифференциацию степени вариабельности эффективности между отраслями.

Максимальные значения CV наблюдаются в высокомаржинальных секторах: технологическом и финансовом, что свидетельствует о значительном разбросе эффективности бизнес-моделей даже в рамках одной отрасли. Напротив, минимальная вариация характерна для секторов с регулируемыми тарифами и высокой стандартизацией услуг: коммунальные услуги и транспорт. Для визуализации полученных результатов была построена столбчатая диаграмма (рис. 4), где сектора упорядочены по убыванию коэффициента вариации. Данный подход визуального представления позволяет оперативно идентифицировать отрасли с наибольшей внутренней неоднородностью компаний по показателю эффективности. Выявленная закономерность имеет важное методологическое значение: высокая вариабельность в технологическом и финансовом секторах указывает на то, что отраслевая принадлежность не является единственным детерминантом эффективности, и успешность компании в значительной степени определяется спецификой бизнес-модели и качеством управления. Анализ выполнялся с использованием языка программирования Python (библиотеки Pandas, NumPy, Matplotlib, Seaborn, SciPy).

Рис. 4 – Коэффициент вариации по секторам

Корреляционный анализ выявил сильную связь выручки и прибыли (r=0,82; p<0,001), умеренную связь численности персонала с выручкой (r=0,73) и прибылью (r=0,58; оба p<0,001). Распределение ROS показало правостороннюю асимметрию (Skewness=2,8) с медианой 0.09 и концентрацией 78% компаний в диапазоне 0–0.2. Межотраслевой анализ (ANOVA: F=24,7; p<0,001) подтвердил значимые различия: технологический сектор лидировал (M=15,2%; SD=8,7%). Апостериорный тест выделил группы: 1) финансы/технологии (12–15%); 2) здравоохранение/ритейл (8–10%). Внутриотраслевой анализ выявил парадокс: сектора с высокой средней ROS (технологии: CV=58%; финансы: CV=42%) имели максимальную вариабельность, тогда как низковариабельные (транспорт: CV=22%; коммунальные услуги: CV=18%) демонстрировали конвергенцию стратегий. Умеренная положительная связь между средним ROS и его вариацией подтверждена корреляцией (r=0,64; p=0,003). Результаты анализа Fortune 1000 выявили количественные взаимосвязи ключевых показателей и значимые меж- и внутрисекторальные различия в эффективности компаний. Перспективные направления включают разработку ML-моделей (регрессия, ARIMA, LSTM) для прогнозирования рентабельности (ROS) на основе исторических данных, отраслевых и макроэкономических факторов, а также создание

алгоритмов (анализ временных рядов, ML без учителя) для автоматического выявления аномалий в динамике прибыли, позволяя оперативно обнаруживать влияние экстраординарных событий (рыночные шоки, регуляторные изменения) или значимых внутренних преобразований (M&A, реструктуризация).

Список литературы

1. Fortune 500 [Электронный ресурс] // Fortune: офиц. сайт. — URL: https://fortune.com/ranking/fortune500/ (дата обращения: 07.06.2025).
2. *Портер М.Е.* Конкурентная стратегия: Методика анализа отраслей и конкурентов / М. Е. Портер; пер. с англ. — М.: Альпина Паблишер, 2015. — 453 с.
3. The future of work in America: people and places, today and tomorrow [Электронный ресурс] / McKinsey & Company. — 2020. — URL: https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/the-future-of-work-in-america-people-and-places-today-and-tomorrow (дата обращения: 07.06.2025).

2.3.1.

В.Д. Хашин, Д.Р. Новиков, А.В. Кожина, В.Р. Козлов, К.Е. Долженко

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева»,
Красноярск, vitalickhashin@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ RAG-СИСТЕМЫ НА ТОЧНОСТЬ ОТВЕТОВ НА ВОПРОСЫ АБИТУРИЕНТОВ

В работе исследуется влияние параметров RAG-системы (Retrieval-Augmented Generation) на качество ответов в контексте обработки естественного языка. Исследование включает анализ ключевых параметров системы, которые влияют на качество ответа. Система предназначена для автоматизированной консультации абитуриентов по вопросам поступления.

Ключевые слова: *RAG, семантический поиск, лексический поиск, чанки, эмбеддинги, гибридный поиск, LLM, большая языковая модель, оптимизация параметров.*

Введение

Развитие RAG-систем (Retrieval-Augmented Generation) открывает новые возможности для создания интеллектуальных ассистентов, способных работать с корпоративными данными. В отличие от чистых генеративных моделей, RAG-подход обеспечивает более точные и обоснованные ответы за счет комбинации: семантического поиска, лексического поиска и генерации ответов на основе найденной информации [1]. Рассматриваемая RAG-система имеет параметры, которые необходимо подобрать таким образом, чтобы система давала наиболее точный ответ. Система будет протестирована на эталонных вопросах и ответах эксперта. В качестве результата будут выведены статистические метрики: accuracy, precision, recall.

Цель исследования

В данной работе рассматривается предварительная оптимизация RAG-системы. Исследуемые параметры представляют собой:

– Коэффициент гибридного поиска, который определяет, сколько именно чанков, в процентном соотношении, будет взято из лексического и семантического методов поиска [2].

$$hybrid(d,q) = \alpha \cdot W(d,q) + (1-\alpha) \cdot L(d,q)$$

Где:

α – весовой коэффициент гибридного поиска,

q – входной запрос,

d – чанки из базы знаний,

$W(d)$ – семантическая оценка релевантности чанков из базы знаний,

$L(d)$ – лексическая оценка релевантности чанков из базы знаний.

– Порог схожести, который отвечает за отсев нерелевантных чанков, с точки зрения алгоритма поиска.

– Максимальное количество входных чанков, которые в систему вместе с запросом. Данный параметр также нуждается в оптимизации в виду ограничения количества входных элементов в контекст модели и способностей модели к обобщению и суммаризации текстов [3].

Постановка задачи

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Исследовать влияние весового коэффициента гибридного поиска на релевантность ответов системы.

2. Определить оптимальное соотношение между лексическим и семантическим поиском

для повышения точности извлечения контекста из базы знаний.

3. Определить порог схожести чанков, при котором исключаются нерелевантные фрагменты информации без потери ключевых данных, влияющих на полноту ответа.

4. Исследовать зависимость качества ответа от максимального количества чанков, передаваемых в LLM.

Структура системы представлена на рисунке 1.

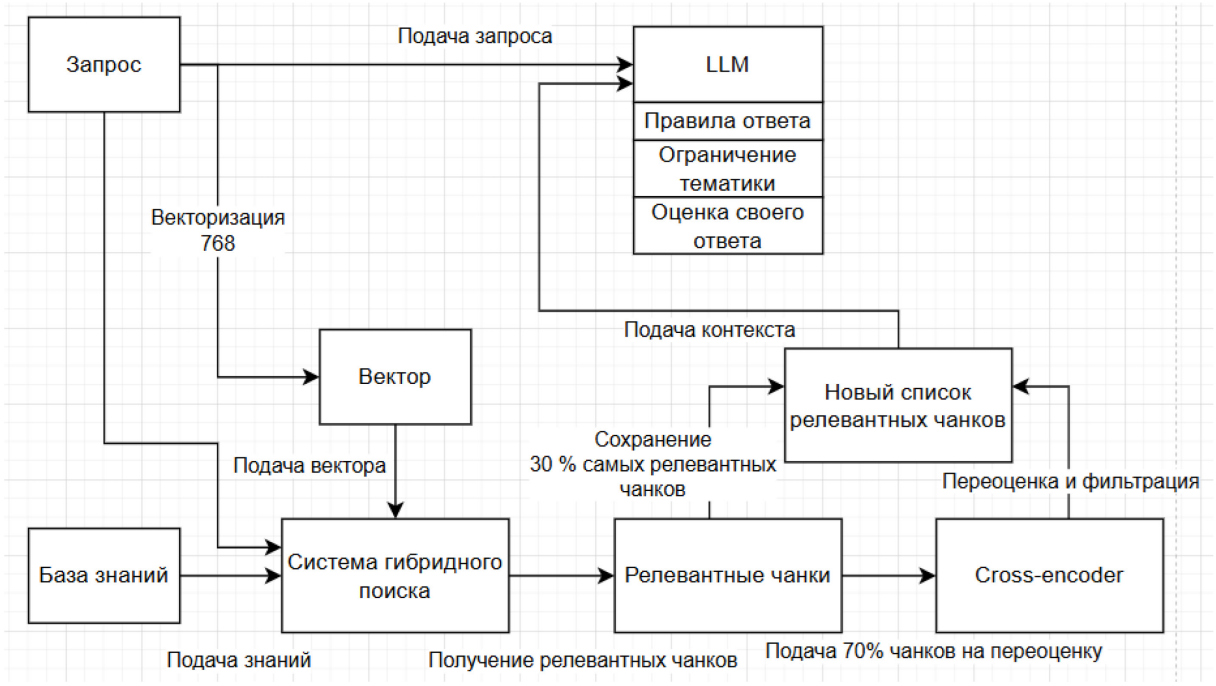


Рис. 1 – Структура RAG-системы

Система гибридного поиска представлена на рисунке 2.

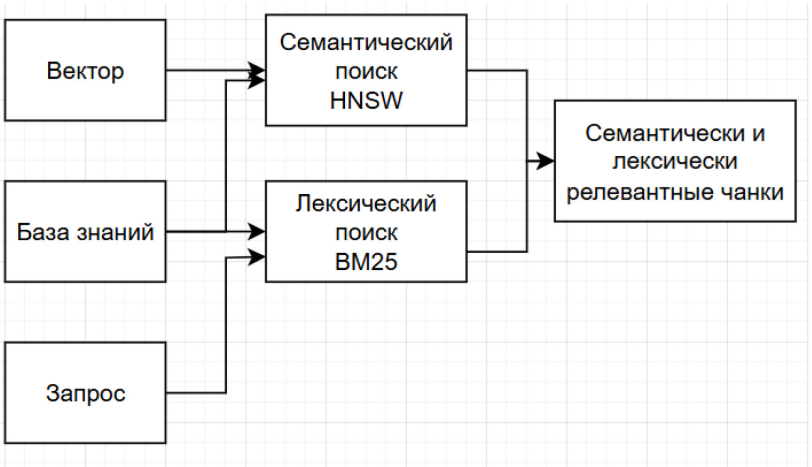


Рис. 2 – Система гибридного поиска

Исследуемые параметры используются в следующих элементах системы:

1. Коэффициент гибридного поиска – используется в системе гибридного поиска.

2. Порог схожести – также используется в системе гибридного поиска. Для адекватного отсева данным коэффициентом чанков, найденных лексическим поиском данные чанки были нормализованы, то есть, приведены в диапазон от нуля до единицы.

3. Максимальное количество входных чанков – используются в момент подачи в LLM вместе с запросом.

Тестирование системы с различными конфигурациями

Для предварительной оптимизации системы был использован решетчатый поиск, выводы подсчитывались на основе сравнения ответов системы с эталонными вопросами и ответами эксперта, в качестве модели – ответчика была выбрана YandexGPT, выборка содержит 50 вопросов, значения исследуемых параметров для решетчатого поиска:

1. Коэффициент гибридного поиска (hw): 0.3, 0.5, 0.7;
2. Порог схожести (st): 0.4, 0.7;
3. Максимальное количество входных чанков (mc): 10, 30, 50.

Результаты представлены в таблице.

Таблица – Результаты исследования

№ п/п	Конфигурация	Accuracy	Precision	Recall
1	hw = 0.3, st = 0.4, mc = 10.	0.64	0.64	1
2	hw = 0.5, st = 0.4, mc = 10.	0.7	0.7	1
3	hw = 0.7, st = 0.4, mc = 10.	0.74	0.74	1
4	hw = 0.3, st = 0.4, mc = 30.	0.74	0.74	1
5	hw = 0.5, st = 0.4, mc = 30.	0.74	0.74	1
6	hw = 0.7, st = 0.4, mc = 30.	0.74	0.74	1
7	hw = 0.3, st = 0.4, mc = 50.	0.74	0.74	1
8	hw = 0.5, st = 0.4, mc = 50.	0.74	0.74	1
9	hw = 0.7, st = 0.4, mc = 50.	0.74	0.74	1
10	hw = 0.3, st = 0.7, mc = 10.	0.74	0.74	1
11	hw = 0.5, st = 0.7, mc = 10.	0.74	0.74	1
12	hw = 0.7, st = 0.7, mc = 10.	0.74	0.74	1
13	hw = 0.3, st = 0.7, mc = 30.	0.7	0.7	1
14	hw = 0.5, st = 0.7, mc = 30.	0.7	0.7	1
15	hw = 0.7, st = 0.7, mc = 30.	0.8	0.8	1
16	hw = 0.3, st = 0.7, mc = 50.	0.8	0.8	1
17	hw = 0.5, st = 0.7, mc = 50.	0.86	0.86	1
18	hw = 0.7, st = 0.7, mc = 50.	0.86	0.86	1

Заключение

Исследование показало, что качество ответов RAG-системы напрямую зависит от настройки ключевых параметров: количества используемых чанков, гибридного веса и порога схожести. При этом наибольшее влияние на точность и полноту ответов оказало количество входных чанков. Увеличение этого параметра до 30-50 позволило модели учитывать больше контекста, что положительно сказалось на её способности находить релевантную информацию и формировать более точные ответы.

Основным механизмом поиска релевантных данных остался семантический поиск, который обеспечивал стабильное качество даже при минимальных значениях других параметров. Порог схожести также влиял на результаты, но только при условии хорошего контекста – при низком пороге возрастала вероятность получения шума, а при высоком – терялись потенциально полезные данные. Модель всегда выдает ответ, поэтому recall во всех конфигурациях был равен 1. Оценки precision и accuracy зависели от того, насколько хорошо найденный контекст соответствовал эталонному ответу.

Наиболее слабыми местами оказались вопросы по контактам, медицинским справкам и особым категориям поступающих – те места, где нужна была точная и актуальная информация.

Список литературы

1. *Бекетов Р.А., Попов С.Д., Кузьмин Я.А., Коценко А.А., Варламов О.О.* Разработка критериев и сравнительный анализ моделей для автоматизированной генерации миварных баз знаний – Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 55. С. 95-99

2. *Полякова А.С., Липинский Л.В., Бежитский С.С., Бежитская Е.А.* Программная система для автоматизированного формирования состава опорного словаря при векторизации текста с помощью самоконфигурируемого многокритериального генетического алгоритма – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024610236, 09.01.2024. Заявка № 2023688668 от 20.12.2023.

3. *Khudonogova Iu., Lipinskiy L., Polyakova A.* System of automated text messages clustering by semantic proximity based on NLP and machine learning methods – В сборнике: Hybrid methods of modeling and optimization in complex systems. Proceedings of the International Workshop “Hybrid methods of modeling and optimization in complex systems” (HMMOCS 2022). London, United Kingdom, 2023. С. 19-31.

2.3.1.

Е.А. Шнякина, В.Н. Костин

Оренбургский государственный университет,
институт математики и информационных технологий,
кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем,
Оренбург, shnelen@mail.ru

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ НАРУШИТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО МОДЕЛИ

В работе представлена оценка вероятности обнаружения, учитывающая характеристики моделей нарушителей. На основе анализа научных публикаций и нормативно-правовых актов выделены шесть моделей нарушителей. Вероятность обнаружения нарушителей пропорциональна уровню их осведомлённости и подготовки, что учитывается с помощью введенного коэффициента, значение которого рассчитано для каждой модели внешних нарушителей.

Ключевые слова: *вероятность обнаружения, модель нарушителя, безопасность объекта.*

Организация контроля физического доступа к защищаемым ресурсам представляет собой первоочередную задачу политики безопасности любого объекта. В последнее время складывается ситуация, характеризующаяся постоянным ростом количества и разнообразия форм и видов угроз различного характера. Вместе с тем, совершенствуются технические возможности нарушителей. Безопасность охраняемых объектов (ОО) обеспечивается системой физической защиты (СФЗ). Первым этапом обеспечения безопасности ОО является обнаружение нарушителя. Факт обнаружения нарушителя инициализирует процессы его задержки и нейтрализации. Перечисленное подтверждает актуальность исследования, целью которого является оценка влияния уровня подготовленности нарушителя на вероятность его обнаружения.

Вопросы, связанные с вероятностью обнаружения подготовленных нарушителей, рассматривают в своих публикациях Звежинский С.С., Журин С., Обоймов А.С. [1-3] и др. Авторы сходятся во мнении, что вероятность обнаружения нарушителей пропорциональна уровню их подготовленности. Продолжая существующие исследования, в данной статье проводится оценка коэффициента снижения эффективности средств обнаружения, учитывающего характеристики нарушителя, который может использоваться при проектировании и оценке эффективности СФЗ.

«Совокупность параметров и характеристик, свойственных потенциальному нарушителю, определяющих его вероятные действия» [4] формирует модель нарушителя. В результате анализа научных работ [5, 6] и нормативно-правовых актов [4] выделены шесть моделей нарушителей, описание которых представлено в таблице 1.

Таблица 1 - Описание моделей нарушителя

Модель нарушителя		Описание
обозначение	тип	
X_1	внешний	террористическая группа численностью от 6 до 20 человек, целью которой является террористический акт федерального или межрегионального масштаба; вооружен; средний уровень осведомленности и высокий уровень подготовки
X_2		групповой нарушитель численностью от 3 до 5 человек, целью противоправных действий которого является совершение террористического акта или хищения межрегионального или регионального масштаба; вооружен; средний уровень осведомленности и средний уровень подготовки
X_3		террорист-смертник, наемник, одиночный нарушитель, целью которого является террористический акт муниципального или локального масштаба; вооружен; обладает низким уровнем осведомленности и средним уровнем подготовки
X_4		неподготовленный «случайный» нарушитель, целью которого является порча, кража, уничтожение локального масштаба; не вооружен; обладает низким уровнем осведомленности и подготовки
X_5	внутренний	рядовой сотрудник объекта, цель которого является хищение локального масштаба, не вооружен, высокий уровень осведомленности об объекте
X_6		сотрудник объекта, имеющий доступ к СФЗ, целью которого является хищение или террористический акт, вступающий в сговор внешними нарушителями; высокий уровень осведомленности о структуре СФЗ, вооружен.

Очевидно, что обнаружение зависит от типа нарушителя (внешний, внутренний). Выявление внутренних нарушителей зависит от уровня всей системы обеспечения безопасности, а именно, от состояния режимной и кадровой работы, проводимой на ОО. Для внешних нарушителей вероятность обнаружения определяется характеристиками, соответствующими определенной модели нарушителя (таблица 1), параметрами комплексов технических средств охраны, а также, зависит от тактики действий при проникновении на территорию ОО. Она может быть: насильственная; обманная; скрытная; комбинированная. Когда проникновение на объект осуществляется с помощью насильственной тактики с использованием фактического разрушения заграждений, применения огнестрельного вооружения, т.е. носит явный характер проникновения на объект, вероятность обнаружения нарушителя равна единице. В остальных случаях, значение вероятности обнаружения является неизвестной величиной.

Системы обнаружения (СО) разрабатываются и проверяются на предмет соответствия заявленной в технической документации вероятности обнаружения для наименее опасной модели нарушителя (x_4), которая характеризуется низким уровнем осведомленности об ОО и его СФЗ, и низким уровнем подготовленности [2]. Чем выше осведомленность нарушителей об ОО, тем ниже становится вероятность его обнаружения. Так, обнаружение злоумышленников, относящихся к третьей модели x_3 происходит уже с меньшей сигнализационной надежностью, а для второй x_2 и первой x_1 моделей сигнализационная надежность любой СО снижается существенно.

Учитывая данные обстоятельства, пусть k – коэффициент, определяемый осведомленностью и подготовленностью нарушителя, тогда вероятность обнаружения нарушителя P_o определяется по формуле:

$$P_o = k \cdot P_{ктсо}, \quad (1)$$

где $P_{ктсо}$ – вероятность комплекса технических средств обнаружения, определяемая

технической документацией ТСО и их комбинацией в конкретной зоне обнаружения. Вычислим значение коэффициента *k*, опираясь на характеристики каждой модели нарушителя (таблица 1). Методом экспертных оценок на основе вербально-числовой шкалы Харрингтона характеристикам уровню осведомленности и подготовки для каждой модели нарушителя задаются числовые значения: x_1 – 7; x_2 – 6; x_3 – 4; x_4 – 3; x_5 – 9; x_6 – 10. Максимальное значение коэффициента *k* принимается равным единице ($k_{max}=1$). Это значение соответствует нарушителям, относящимся к модели x_4. Для внутренних нарушителей значение коэффициента *k* является минимальным и принимается равным нулю ($k_{min}=0$). Отобразим диапазон значений экспертных оценок, характеризующих модели нарушителей [3; 10] на отрезок [0; 1] – диапазон значений коэффициента *k*. Оценим сжимающий коэффициент Δ:

$$\Delta = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}, \quad (2)$$

где $y_{max}=10$ – максимальное значение осведомленности и подготовленности нарушителя, $y_{mim}=3$ – соответственно минимальное значение осведомленности и подготовленности нарушителя. Тогда Δ=1/7.

Полученные значения коэффициентов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значение коэффициента *k*

	Модель нарушителя			
	X_1	X_2	X_3	X_4
k	0,43	0,57	0,86	1

Вычисленные значения коэффициента *k* согласуются с результатами, представленными в исследованиях [1-3].

Таким образом, получены следующие результаты: выделены шесть моделей нарушителей; предложен способ оценки вероятности обнаружения нарушителя, учитывающий уровень его осведомленности и подготовки; для каждой модели нарушителя вычислены коэффициенты, влияющие на вероятность обнаружения.

Список литературы

1. *Журин С.* Сертификация наполовину Кто гарантирует обнаружение подготовленного нарушителя?/ С. Журин// Безопасность. Достоверность. Информация. – 2005. – № 60. – С. 32-36.

2. *Звежинский С., Козлов С.. Львов Д.* Что остановит подготовленного нарушителя? Технические, финансовые и психологические барьеры/ С. Звежинский, С. Козлов, Д. Львов// Системы безопасности. – 2018. - №4. – URL: http://lib.secuteck.ru/articles2/kompleks_sys_sec/chto-ostanovit-podgotovlennogo-narushitelyatehnicheskie--finansovye-i-psihologicheskie-barery (дата обращения 15.04.2025)

3. *Обоймов А.С.* Оценка эффективности систем физической защиты. Обнаружение наиболее вероятных и опасных сценариев атак на СФЗ/ А.С. Обоймов// Успехи современной науки. – 2016. – Т.8. - №12. - С. – 52-58

4. ГОСТ Р 52551-2016 Национальный стандарт РФ. Системы охраны и безопасности. Термины и определения. от 07.01.2017 – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200141714 (дата обращения 15.04.2025)

5. *Герлинг Е.Ю.*, *Ахрамеева К.А.* Формирование моделей нарушителей систем контроля и управления доступом на объекте/ Е. Ю. Герлинг, К. А. Ахрамеева// Инновационные технологии и вопросы обеспечения безопасности реальной экономики: сборник научных трудов по итогам Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 марта 2020 года/ Под редакцией Г.В. Лепеша, О.Д. Угольниковой, С.Ю. Александровой. – СПб: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2020. – С. 58-65.

6. *Олейник А.С.* Формирование модели нарушителя при нападении на важный государственный объект/ А. С. Олейник // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 6(102). – С. 691-704.

2.3.1.

Т.М. Юсупов, О.В. Павлов, О.В. Хомутская

Московский Авиационный Институт (национальный исследовательский университет),
институт №3 «Системы управления, информатика и электроэнергетика)»,
кафедра 307 «Цифровые технологии и информационные системы»
Москва, supercakeman@yandex.ru, oleg101-101@mail.ru,KhomutskayaOV@gmail.com

ТЕХНОЛОГИЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА МЕТОДОМ ПРОЦЕССИНГА ДАННЫХ НА БАЗЕ КРИВОЙ МОРТОНА

В работе представлены результаты анализа технологии построения цифровых моделей рельефа на базе методов процессинга данных. В отличие от стандартных подходов, основанных на использовании дерева квадрантов, предложенный метод отображения цифровых моделей рельефа методом процессинга на базе кривой Мортона демонстрирует большую эффективность в работе с памятью, также улучшенные возможности к параллельной обработке данных. Это открывает перспективы для новых возможностей масштабируемой обработки пространственных данных в рамках современных геоинформационных технологий.

Ключевые слова: *ГИС, процессинг данных, дерево квадрантов, цифровые модели рельефа.*

Текущие методы отображения трёхмерной цифровой модели рельефа в своей основе построены на использовании дерева квадрантов. Эта закономерность логически обоснована: в современных потребительских картографических сервисах структура хранения данных имеет древовидную структуру. Кроме того, такой специфический подход эволюционно развивался в рамках развития возможностей геоинформационных технологий. [1, 2]

Тем не менее, реализация данного метода сопряжена с рядом сложностей, включая проблемы синхронизации и управления данными в режиме реального времени, высокую сложность настройки, а также значительные затраты динамической памяти, обусловленные использованием динамических структур данных. [3, 4]

Следует также отметить ограничения, присущие параллельной обработке деревьев квадрантов. Жёсткая взаимозависимость между узлами данной структуры существенно снижает возможности распараллеливания, затрудняя декомпозицию данных ввиду организации предварительной индексации узлов дерева. Это негативно сказывается на масштабируемости и ограничивает общую оптимизацию процесса обработки. Дополнительные сложности возникают при использовании неоднородных квадродеревьев, нередко применяемых для визуализации трёхмерного рельефа. В таких структурах отдельные ветви могут иметь существенно различную глубину, что делает невозможным заранее спрогнозировать объём вычислений и равномерно распределить нагрузку между потоками. Из-за этого снижается эффективность распараллеливания, а планирование выполнения задач требует дополнительных ресурсов и усложнённой логики. [5]

В последнее время процессинг данных стал активнее применяться в самых разных областях информатики. Такое явление обусловлено необходимостью оперативной обработки информации в реальном времени, а также развитием аппаратных платформ, способных эффективно выполнять потоковые и параллельные вычисления. Кроме того, широкое распространение получили модели вычислений, ориентированные на распределённую локальную параллелизацию, что делает процессинг линейных структур более предпочтительным по сравнению с традиционными иерархическими структурами, требующими жёсткой организации.

В данной статье рассматривается подход к отображению трёхмерной цифровой модели рельефа, основанный на концепции потоковой обработки данных. Ключевая идея метода заключается в отказе от иерархической структуры хранения и в линейной обработке входного потока геоданных. В рамках предлагаемой модели все тайлы (от англ. *tile* – клетка, элемент мозаичной геопространственной разбивки) обладают равным приоритетом, а каждый из них обрабатывается независимо – локально параллельно, что обеспечивает большую гибкость по сравнению со стандартными способами организации процесса. [6]

Идея линеаризации иерархических структур не является новой. Например, можем вспомнить кривую Мортона (Z-порядок), применяемую для отображения многомерных пространственных данных в линейную последовательность с сохранением локальности. Это позволяет обрабатывать элементы, близкие в пространстве, как последовательные блоки памяти, что особенно эффективно при потоковой или параллельной обработке. Использование такого подхода исключает необходимость построения дерева квадрантов и обхода его внутренних узлов, а значит тайлы могут обрабатываться напрямую, по мере поступления, без необходимости ожидания построения иерархии. Использование линейных квадродеревьев открывает возможность мгновенного запуска параллельной обработки — как поштучно, так и блоками — с равномерным распределением нагрузки между потоками. [7, с. 34]

На рисунке 1 можно наглядно увидеть проблему построения дерева квадрантов: часть ресурсов уходит на генерацию не отображаемых узлов, а также уменьшается локальность в памяти – в процессе обработки тайлы разных уровней (Z) перемежаются между собой. Данного чередования можно избежать, обходя дерево квадрантов в ширину, но такой способ значительно повысит количество потребляемой памяти. [8]

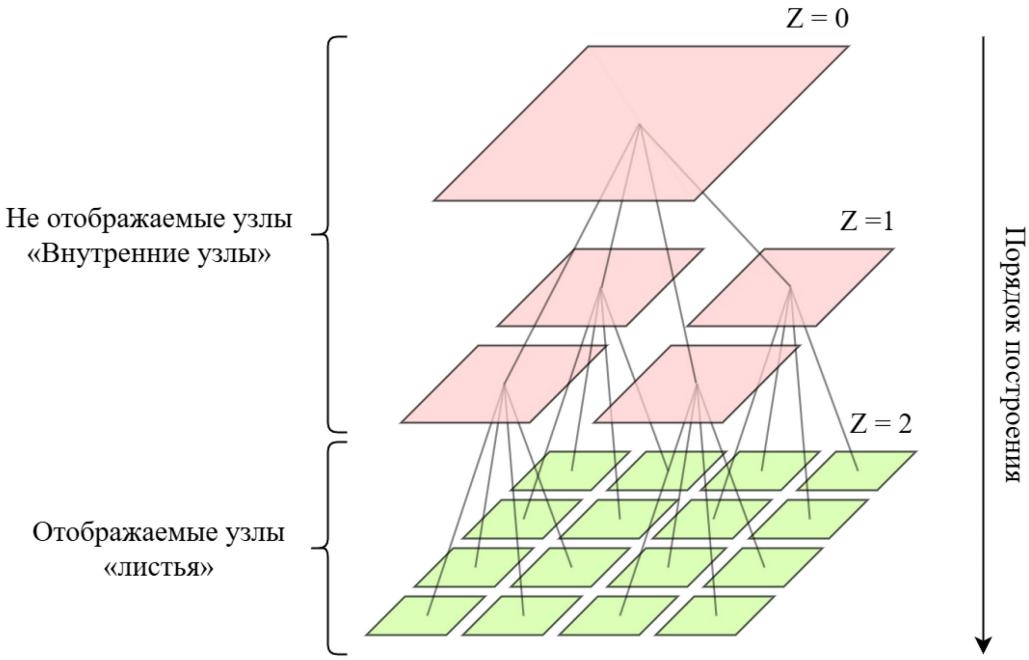


Рис. 1 – Построение дерева квадрантов

На рисунке 2 изображён порядок обхода кривой Мортона. Как можно увидеть на данном изображении – при обходе не задействованы тайлы, в которых нет потребности к отображению, что не только ускоряет обход структуры, но и избавляет структуру от иерархически разных компонентов, а значит и позволяет обрабатывать все участки данных одинаковым способом. [9, с. 63]

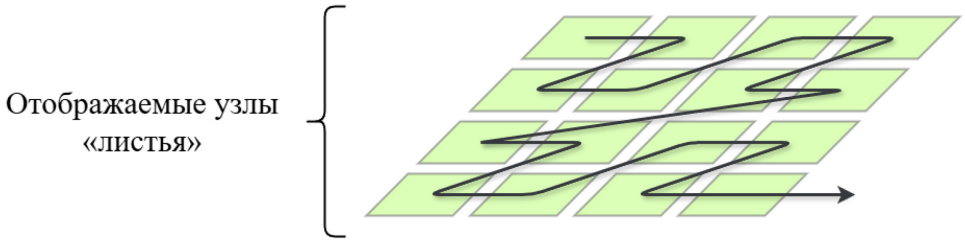


Рис. 2 – Построение кривой Мортона

На рисунке 3 изображены результативные данные разных подходов структурирования данных. X и Y – это индексы тайла в пределах уровня Z, где Z – это глубина дерева квадрантов.

Рис. 3– Сравнение обхода дерева квадрантов и кривой Мортона

На первый взгляд сложно оценить иерархическое уравнивание полученных данных наборов, однако это открывает новые возможности к оптимизации. На рисунке 4 схематично изображен случай перестройки кривой Мортона, например, при перемещении по плоскости карты. Иерархическое выравнивание элементов позволяет последовательно сравнить две коллекции и выделить элементы следующих видов: удалённые тайлы, оставшиеся и добавленные. Такой подход позволяет избежать высокой степени дублирования данных, которую можно наблюдать при перестройке дерева квадрантов и проще чем задача нахождения разницы двух квадродеревьев.

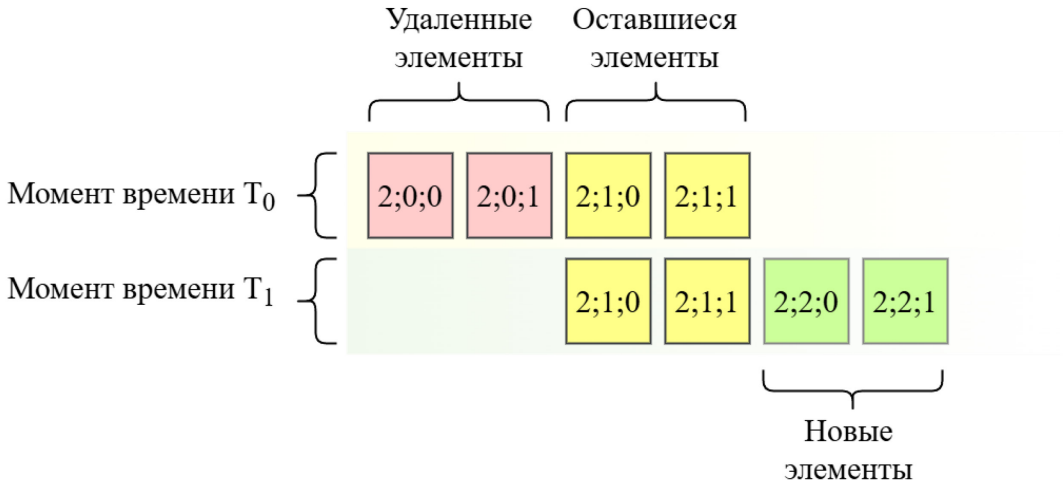


Рис. 4 – Перемещение кривой Мортона

Иерархическое выравнивание данных путём использования кривой Мортона может являться основой процессинга данных. Метод позволяет объединять наборы элементов в блоки и применять к ним унифицированные алгоритмы загрузки данных и их применения – в этом и состоит главное преимущество метода процессинга: унификация алгоритмов и независимости участков данных друг от друга, т. е. каждый отдельный тайл не связан с соседними или родительскими, соответственно, и все прочие алгоритмы процессинга должны учитывать эту особенность. [10, с. 2]

Из этого следуют и недостатки данного подхода, к ним можно отнести сложность получения внутренних узлов – эта проблема может возникнуть, например, при реализации загрузки и применения данных от более низких значений глубины и поэтапного перехода к более высоким, такой способ зачастую используется для улучшения визуального отображения трёхмерного цифрового рельефа.

В заключение можно сделать вывод о том, что для большинства потребительских сервисов отображения трёхмерного цифрового рельефа использование дерева квадрантов остаётся целесообразным и логически обоснованным, особенно в задачах с заранее известной структурой данных и при ограниченных требованиях к динамике обновления. Однако при обработке потоков данных в реальном времени, реализации параллельных или распределённых вычислений, а также при необходимости ускоренной визуализации больших объёмов информации, метод процессинга данных может демонстрировать преимущество по масштабируемости и гибкости системы.

Список литературы

1. *Зеленев Д.В.* Методы рендеринга ландшафта / Д. В. Зеленев. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2020. — № 41 (331). — С. 14-19. — URL: https://moluch.ru/archive/331/73961/. (дата обращения: 04.05.2025).

2. Stefanakis E. Web Mercator and Raster Tile Maps: Two Cornerstones of Online Map Service Providers // Geomatica. — 2017. — Т. 71, № 2. — С. 100–109. — DOI: 10.5623/cig2017-203.

3. *Sardadi M.M., Rahim M.S. M. M., Jupri Z., Daman D.B.* Choosing R-tree or Quadtree Spatial Data Indexing in One Oracle Spatial Database System to Make Faster Showing Geographical Map in Mobile Geographical Information System Technology // International Journal of Humanities and Social Sciences. — 2009. — Т. 3, № 4. — С. 1–5. — URL: https://www.kau.edu.sa/files/830/researches/56647_26929.pdf (дата обращения: 04.05.2025).

4. *Болтов Ю.Ф., Дудаков Л.С., Тарлыков А.В.* РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕДУРНО ГЕНЕРИРУЕМОГО ЛАНДШАФТА ПРИ ПОМОЩИ АЛГОРИТМА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ «ДЕРЕВО КВАДРАНТОВ». Труды учебных заведений связи. 2016;2(2):28-33.

5. *Bern M., Eppstein D., Teng S.-H.* Parallel construction of quadtrees and quality triangulations // Dehne F., Sack J.R., Santoro N., Whitesides S. (ред.) Algorithms and Data Structures. WADS 1993. Lecture Notes in Computer Science, т. 709. Springer, Berlin, Heidelberg, 1993. — С. 188–199. — DOI: 10.1007/3-540-57155-8_247.

6. *Raposo A., Feijó B., Valdetaro A., de Toledo R., Nunes G.* LOD Terrain Rendering by Local Parallel Processing on GPU // Brazilian Symposium on Games and Digital Entertainment. — Florianópolis, Brazil, 2010. — С. 182–188. — DOI: 10.1109/SBGAMES.2010.30.

7. *Гонахчян В.И.* Адаптивная стратегия рендеринга динамических трехмерных сцен : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2021. — С. 150.

8. *Haverkort. H., Toma L.* Quadtrees and Morton Indexing // Encyclopedia of Algorithms / ред. M.-Y. Kao. — New York : Springer, 2016. — С. 1637–1642. — URL: https://link.springer.com/rwe/10.1007/978-1-4939-2864-4_585 (дата обращения: 04.05.2025).

9. *Abraham J. Stephens* Control of spatial and temporal fidelity with adaptive sampling: дис. ... д-ра филос. – Солт-Лейк-Сити, 2011. – С. 63.

10. *Aref W.G., Samet H. Efficient Window Block Retrieval in Quadtree-Based Spatial Databases* // GeoInformatica. — 1997. — Т. 17 № 4. — С. 59–91. — DOI: 10.1023/A:1009760201355

2.3.1.

С.Л. Моругин

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,
институт радиоэлектроники и информационных технологий,
кафедра Компьютерные технологии в проектировании и производстве,
Нижний Новгород, smorugin@yandex.ru

МОДЕЛЬ ДИАЛОГА С АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СЛУЖБОЙ ПОДДЕРЖКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОБЛЕМ КЛИЕНТОВ

Предложена модель диалога службы автоматизированной поддержки клиентов, определяющая стратегию верхнего уровня поведения системы, которая может быть использована в формате сайтов, в чат ботах с ИИ, электронных обучающих и информационно-справочных системах.

Основанная на сети в виде графа с мультивершинами модель диалога позволяет: задавать целевое поведение при случайных ответах клиента и соответствующих им случайных переходах в рамках проблемы; минимизировать цену достижения цели (количество и сложность вопросов, задаваемых клиенту, объем предоставляемой информации); решать задачи выбора вопросов и выдачи информации для клиентов разных категорий подготовленности на основе единой методики ведения диалога, основанной на минимизации расстояния до цели.

Ключевые слова: *автоматизированные службы поддержки, модель диалога, графы, семантические сети.*

Введение. Актуальность исследования обусловлена ускоренным развитием автоматизированных служб поддержки (АСП) клиентов, которые используются в кредитно-финансовых организациях, в процессе диагностики неисправностей, в онлайн торговле и даже в системах поддержке программистов при написании кода**.** Перспективным направлением систем поддержки является использование технологии чат-ботов с искусственным интеллектом для автоматизации процессов взаимодействия с пользователями,

Внедрение технологии чат ботов может в значительной мере повысить уровень качества удовлетворения потребностей пользователей и оптимизировать затраты различных лиц и организаций, которые могут требовать наличия удобных и функциональных решений для упрощения развертывания своего сервиса с целью необходимости обслуживания клиентов. Повышение клиенто-ориентированности и другие позитивные факторы распространения своих услуг посредством применения чат бота в значительной степени зависят от логики работы и заложенной в него модели диалога.

Модель принятия решения в области проблем клиента. Специализированная АСП с поддержкой ИИ располагает информационными продуктами (информационными ресурсами) в определенной области.

Принятие решения Клиентом (КЛ) в диалоге с АСП сталкивается с проблемой или набором проблем, связанных с предметной областью, включая неполную информацию, временны*е* ограничения, конфликты интересов, риски и неопределённость [1,2]. В управлении научными проектами тоже известна проблема чрезмерного усложнения принятия решения.

Пример: КЛ хочет принять решение о выборе вклада или счета, о направлении инвестиций или др.

Общее описание стратегии диалога. АСП полагает, что КЛ приблизительно знает, чего он хочет, чтобы обозначить проблемную область. Специализированный в определенной области АСП должна знать, что можно предложить КЛ в направлении реализации его желаний. АСП уточняет проблемы КЛ и предоставляет ему информацию о возможных путях решения с помощью информационных продуктов. АСП старается направить КЛ в сторону принятия решений, выгодных как для КЛ, так и для владельца АСП.

Цель КЛ в диалоге – получить информацию, способствующую уменьшению неопределенности при принятии решения, проблемы которого могут быть осознаны и сформулированы достаточно обобщенно [2,3].

Цель АСП в общении с КЛ – предоставить информацию о решениях и продуктах, достаточную для обоснованного и убедительного для КЛ принятия решения на данном этапе.

При этом АСП функционирует при соблюдении следующих принципов:

- информация предоставляется клиенту порциями, усвоение которых, как и отношение КЛ к которым, может быть проверено по его реакции;

- представленная АСП информация, базирующаяся на основе решений или продуктов компании, должна быть достаточна для выбора решения проблемы клиентом;

- АСП формирует персонифицированную модель КЛ, которая учитывает принятую КЛ информацию и статус состояния модели. По мере беседы статус модели КЛ меняется от общей кластеризованной до более глубоко персонифицированной [3];

- АСП оценивает отношение к представленной информации по изменению модели КЛ. АСП не знает, что последует за диалогом, какое окончательное решение примет КЛ, но она оценивает готовность к решению тех или иных задач, актуальных для КЛ в рамках модели.

Основным объектом диалога является Проблема. Проблема состоит в необходимости представления убедительной для КЛ информации для последующего принятии им решения.

Проблема - часть проблемной области, разрешение которой (снятие неопределенности) является одной из целей КЛ. Проблема соответствует подсети в модели диалога с КЛ.

Конечное решение КЛ примет сам. АСП должна снять (разрешить частично или полностью) проблемы, связанные с принятием решения, которые носят информационный характер. В их числе: проблему неполной информации и недостатка данных; проблему конфликта интересов; проблему чрезмерного усложнения принятия решения; проблему рисков и неопределённости; проблему ограниченного времени [3].

Цель АСП в диалоге – вывести КЛ на высокий уровень зрелости для решения проблемы и обеспечить ему достаточную степень информированности, подвести КЛ к согласию на сотрудничество путем снятия информационных проблем. АСП оценивает:

- статус КЛ - степень зрелости КЛ для устранения проблемы, включая убежденность в возможности ее устранения предлагаемыми продуктами и методами.

- степень информационной достаточности для решения проблемы – оценку уровня информированности КЛ.

Модель КЛ (иными словами, модель знаний АСП о КЛ) включает его личные данные и модели проблем КЛ (далее МПКЛ).

Модель КЛ = {Личные данные, МПКЛ_1,…, МПКЛ_N}, для i=1,...,N

МПКЛ_1 = {Оценка статуса КЛ в задаче, Полученные элементы информации, Полученные элементы убеждения, Отношение к элементам информации, Отношение к элементам убеждения}

Модель знаний о клиенте и о его проблемах в выбранной предметной области представляется в виде семантической сети с элементами иерархии, которая представляется в виде ориентированного графа и включает в себя вершины (узлы) и дуги (ребра, переходы), задающие отношения между вершинами [4,5].

Иерархия в модели знаний о проблеме КЛ. Объектами предметной области являются Проблемы, подпроблемы и информационные объекты.

Подпроблема - часть проблемы, связанная группа элементов пути КЛ в процессе диалога, прохождение которой способствует решению проблемы. Подпроблема соответствует

специальному элементу графа в модели диалога.

Информационный объект – элементы информации, вопрос(ы), ожидаемые ответы, правила и настройки для интерпретации ответов КЛ, которые нужно предоставить КЛ или получить от него, чтобы получить решение подпроблемы.

Введем элемент графа, который назовем мультивершиной (МВ), он логически соответствует подпроблеме. Мультивершина может иметь один или несколько входов и один или несколько выходов. Каждый вход связан с одним или несколькими внешними входными переходами (ребрами) и выходными переходами. Между входами и выходами мультивершины выполняются переходы на основе обработки ответов КЛ – внутренние переходы. Мультивершина является аналогом свернутого подграфа, со свойствами, отличающимися от внешнего графа, который соединяет МВ.

Общая формальная цель АСП в процессе диалога – пройти от начальной МВ сети проблем до конечной (целевой) МВ.

У каждого перехода вход-выход в пределах МВ задается своя цена прохождения мультивершины, поскольку это требует усилий клиента. На рис.1 показана мультивершина с двумя входами (красным) и тремя выходами (зеленым).

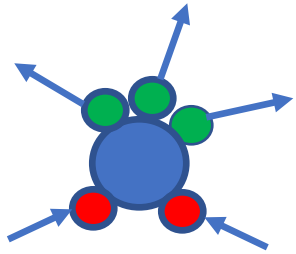


Рис. 1 – Пример мультивершины

Модель проблемы представляет собой подсеть из мультивершин, которая должна быть непротиворечивой и полной:

- каждый выход одной МВ должен быть связан ребром с хотя бы к одним входом другой МВ, каждый вход одной МВ должен быть соединен хотя бы с одним выходом другой МВ;
- если при определении пути вошли в любой вход мультивершины, то можем потенциально попасть на любой выход этой мультивершины (матрица внутренних переходов мультивершины должна изначально быть полная); КЛ может запретить часть или все переходы внутри МВ своими ответами;
- не должно быть подсетей, не связанных с входом и выходом Проблемы (мультивершиной цели), например, подсетей с зацикленными переходами.

Мультивершины как часть сети выделены по двум причинам.

1) Прохождение внутри мультивершин имеет условную цену, поскольку требует ознакомления КЛ с новой информацией и ответов на вопросы АСП. Переходы между МВ выполняет АСП на основе ранее полученных ответов клиента, их цена может быть равна нулю, поскольку не требует усилий КЛ. Выполнение переходов внутри МВ зависит от ответов КЛ, т.е. в основном определяется им.

2) Структура переходов внутри МВ и их цена может меняться после ответов КЛ. Структура внешних по отношению к МВ переходов не меняется. Эти переходы задаются изначально при конструировании модели диалога. Переходы между МВ определяет АСП после получения ответов КЛ.

Таким образом, переходы сети разделены на два множества: внешние по отношению к МВ, структура которых не меняется, и внутренние (в пределах МВ), структура которых и/или цена может меняться от ответов КЛ.

Перемещение по сети в рамках проблемы. Среди выходов МВ можно выделить ключевые выходы, которые должны быть обязательно достигнуты в ходе движения от входной МВ к целевой. В силу ориентированности графа сети движение от входа к цели через МВ и их ключевые выходы, скорее всего, потребует прохождения несколькими

путями, в том числе частично совмещенными.

Путь – список переходов вида выход МВ – вход МВ (внешние переходы) и вход МВ – выход МВ (внутренние переходы). Цель АСП с точки зрения перемещения по семантической сети – пройти набор ключевых МВ и их выходов, необходимых для решения Проблемы, в ходе чего подтвердить их приемлемость для КЛ или установить нежелание КЛ к таким переходам, что приведет к необходимости переходить к другой Проблеме.

Правила перемещения по сети, определяющие общую стратегию ведения диалога в пределах одной Проблемы:

1) можно перемещаться между МВ (подпроблемами) по направленным ребрам. Выходные узлы МВ, которые были достигнуты, помечаются как пройденные. Выход из Проблемы перемещает диалог с КЛ в другую Проблему, если общий диалог не закончен;

2) переход между МВ в общем случае может быть выполнен несколькими путями по разным ребрам. Выбор пути зависит от ответов КЛ, задающих состояние выходных узлов модели диалога с КЛ;

3) переходы внутри МВ меняют ее состояние, но, пока не достигнуты выходы, не дают новых возможностей перехода к другим МВ (подпроблемам), т.е. переход от одного состояния МВ к другому значению состояния той же МВ – это переход внутренний;

4) после прохождения по внутреннему переходу один раз цена его становится равной нулю для текущего сеанса;

5) если КЛ запретил прохождение по внутреннему переходу, цена перехода может быть установлена бесконечной (полный запрет) или высокой.

На каждом шаге диалога выполняется один переход. Если для следующих переходов не требуются ответы КЛ, эти переходы могут быть выполнены автоматически.

Чтобы достичь цели, надо пройти все ключевые узлы, двигаясь от входной МВ к целевой по множеству путей, имеющих общие переходы. Операция объединения путей создает подсеть P_U с неповторяющимися переходами

$$P_U = \bigcup_{i=1}^{N} P_i.$$

Стоимость S_i отдельного пути P_i – сумма цен всех переходов (ребер) пути s_{ij}

$$S_i = \sum_{j=1}^{N_i} s_{ij}.$$

Стоимость прохождения объединенного пути – сумма стоимостей неповторяющихся переходов s_k, поскольку повторное прохождение переходов имеет нулевую стоимость,

$$S_o = \sum_{k=1}^{NO} s_k,$$

где N0- число переходов от текущей позиции до цели в объединенном пути. Переходы с нулевой стоимостью (внешние) можно не учитывать. Обозначим множество весов неповторяющихся переходов в объединенном пути $G_{s,}$ тогда

$$S_0 = \sum s_k\,, \forall s_k \in G_s.$$

Назовем расстоянием $R = S_o(T)$ до цели от текущей позиции стоимость S_o достижения цели при прохождении объединения путей. По сути, расстояние – это суммарная длина всех неповторяющихся переходов внутри МВ, которые должны быть пройдены от текущей позиции до цели.

Текущая позиция T определяется пройденными мультивершинами. Наиболее выгодный маршрут тот, который соответствует критерию выгоды (кратчайший, самый дешёвый, совокупный критерий и тому подобное). Посещенные или пройденные МВ и их состояние определяют позицию T по отношению к Проблеме, иными словами, текущее состояние модели диалога.

Расстояние на каждом шаге зависит от позиции T, запретов на перемещения и критерия выгоды (цены переходов), которые в общем случае зависят от ответов КЛ.

Структура сети меняется в процессе ее прохождения из-за запретов КЛ, которые следуют

из его ответов, на некоторые переходы или посещение некоторых мультивершин.

Отличие модели диалога от традиционной задачи коммивояжера. *Задача коммивояжера* – найти самый выгодный маршрут, проходящий через указанные города (узлы сети) [6]. Дополнительные условия – вернуться в родной город, посетить все города не более одного раза. При этом структура сети и возможности перемещения не меняются в ходе движения коммивояжера. Любое перемещение коммивояжера связано с увеличением длины пути.

Задача целевого диалога. Пройти от начального узла входа до целевого узла выхода с минимальными затратами на прохождение сети. Двигаться можно только по ребрам (переходам). В процессе движения возможен запрет со стороны КЛ на прохождение некоторых внутренних переходов или изменение их цены. Повторное прохождение перехода имеет нулевую стоимость. Длина внешних ребер и количество прохождений переходов не имеет значения. В некотором смысле это задача, дуальная по отношению к задаче коммивояжера: прохождение мультивершин (узлов сети) – имеет ненулевую стоимость, движение между узлами сети – имеет нулевую стоимость. Задача управления диалогом – аналог задачи о наведения мостов: когда мост готов, можно по нему двигаться быстро и много раз.

При прохождении мультивершины задаются вопросы и обрабатываются ответы КЛ. После обработки, если мультивершина пройдена до одного из узлов-выходов, выставляются разрешения на дальнейшие переходы с этого выхода. Сами переходы к другим МВ могут произойти позже по мере надобности. Полученные разрешения действуют до конца сеанса с КЛ или долговременно.

Каждая мультивершина *U* сети содержит набор переходов к другим узлам или внутренних переходов с условиями, которые КЛ подтверждает своими ответами

$$U = \{T, EI, EO, EOI, EOC, Gp, Su\},$$

где $Gp = \{P_{11}, P_{12}, \dots, P_{i1i2}, \dots\}$ - список возможных переходов P_{i1i2} из входных узлов i_1 текущей МВ к выходным узлам i_2 этой МВ,

P_{i1i2} = {<идентификатор >, <множество условий для перехода от узла *i1*к узлу *i2*>}.

Критерий правильности выбора пути в процессе диалога – уменьшение расстояния от текущей позиции до цели с учетом стоимости перехода.

В этом смысле все переходы, уменьшающие расстояние, равноценны (чем дороже переход, тем больше он уменьшает расстояние, но и цена выполнения перехода выше). Для того, чтобы диалог не носил хаотичный характер, целесообразно ввести дополнительные веса критерия,

1) Зависящие от степени смены темы (перехода к другой МВ). Если мы продолжаем двигаться в рамках одной подзадачи, множитель равен 1, если переходим к другой – больше 1.

2) Зависящие от ожидаемой вероятности отрицательного ответа о возможности перехода.

Задача выбора перехода P_k на каждом шаге диалога поставлена так

$$P_k \rightarrow arg\ min_k K(\ R(T(P_k), s_k, Q(Pd, P_k), W(P_k), M(P_k)), \forall\ k \in \overrightarrow{1, N0}$$

где P_k – один из возможных ранее не пройденных переходов объединенного пути с индексом *k*, $Q(Pd,P_k)$ – функция штрафа за смену темы по отношению к активной точке диалога *Pd*, $W(P_k)$ – вероятность успешного выполнения перехода или рейтинг перехода, $M(P_k)$ – компонент влияния перехода P_k на мотивированность КЛ к продолжению диалога.

На каждом шаге диалога задача АСП – оценить наиболее короткий путь к цели, исходя из состояния позиции и указанных выше факторов, иными словами, улучшить позицию модели диалога с КЛ в Проблеме. АСП должна выдать такую информацию или задавать такие вопросы, чтобы максимально улучшить оценку *K* позиции модели диалога с КЛ в Проблеме.

В рамках Проблемы диалог *D* – набор вопросов и ответов, включающих элементы информации АСП и КЛ.

Общий алгоритм диалога, в котором ведущей является АСП, можно записать так

$$D = \{D_1, D_2, \dots, D_i, \dots\},$$

где i – номер шага диалога,

$$D_i = \{P_{ki} = argmin(K(P_{ki})),\ I_i = V(P_{ki}),\ Gs_i = \varphi(A_i, Q_i)\},$$

$K(P_{ki})$ – оценка позиции на шаге диалога i для выбранного перехода P_{ki};

A_i – ответ пользователя на шаге диалога i;

I_i – информация выдаваемая АСП клиенту (элементы презентации, вопросы, обоснования и др.);

φ – функция интерпретации ответа КЛ на вопрос Q_i ;

Gs_i – множество весов внутренних переходов МВ, связанных с переходом P_{ki}.

Заключение. Модель диалога может быть использована в стратегии поведения системы верхнего уровня АСП клиентов в виде сайтов, в чат ботах с ИИ в мессенджерах, включающих требуемые для реализации технологии, в электронных обучающих и информационно-справочных системах.

Предложенная модель диалога позволяет:

- определить целевое поведение АСП при случайных ответах КЛ и соответствующих им случайных переходах в рамках проблемы;
- минимизировать цену достижения цели (количество и сложность вопросов, задаваемых КЛ, объем предоставляемой информации);
- учитывать статус квалификации (зрелости) КЛ при ведении диалога;
- не повторять вопросы при последующем продолжении сеанса и помнить состояние модели проблемы КЛ. Диалог может быть без противоречий продолжен с того места, где он прервался ранее;
- решать задачи выбора вопросов и выдачи информации для пользователей разных категорий подготовленности на основе единой методики ведения диалога, основанной на минимизации расстояния до цели;
- учитывать мотивированность КЛ и его эмоциональное состояние;

Можно ожидать, что такая модель диалога позволит более эффективно снимать информационные проблемы клиентов, избегать повторения вопросов и повторной выдачи информации при перемене темы диалога, учитывать текущее состояние клиентов.

Список литературы

1. *Сари А.К., Вирнилия Н., Сусанто Дж.Т., Фиедоно К.А., Хартоно Т.К.* Развитие чат-ботов в мире бизнеса. Журнал «Достижения в области науки, технологий и инженерных систем», 2020, 5 (6), 627-635.

2. *Калдарини Г., Джаф С., МакГарри К.* Обзор литературы о последних достижениях в области чат-ботов. Информация, 2022,13(1), 41.

3. *Гупта А., Хатвар Д., Виджаякумар А.* Знакомство с чат-ботами с искусственным интеллектом. Международный журнал инженерных исследований и технологий, 2020, 9 (7), 255–258.

4. *Акимов О.Е.* Дискретная математика: логика, группы, графы. 2-е изд., доп. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. 376 с.: ил. ISBN 5-93208-025-6

5. *Дистель Р.* Теория графов / Пер. с англ. Новосибирск: Изд-во Института математики, 2002, 225 с., ил. ISBN 5-86134-101-X.

6. *Gross J.L., Yellen J.* Graph theory and its applications. Second edition. Boca Raton—London—New York: Chapman & Hall/CRC, 2006.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ — 2.3.3.

2.3.3.

Д.Е. Абрамов, Ш.Р. Мурадхаджаев, О.Г. Морозов,
И.И. Нуреев, Р.А. Юсупов, Ш.Р. Юсупов, А.Л. Овчинников

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ,
кафедра радиофотоники и микроволновых технологий,
кафедра физической культуры и спорта, кафедра спортивной инженерии,
НИИ прикладной электродинамики, фотоники и живых систем,
НИИ медико-биологической и спортивной инженерии,
Казань, OGMorozov@kai.ru

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДАТЧИКА ДИАПАЗОНА 5 ГГЦ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛАКТАТА В ПОТЕ СПОРТСМЕНА

Диапазон частот 5 ГГц широко используется в телекоммуникационных технологиях, например, Wi-Fi (стандарт 802.11ac), что делает его более доступным для внедрения в различных сенсорных системах. Использование этого диапазона позволяет легко интегрировать микроволновые датчики в мобильные устройства и системы мониторинга с минимальными затратами. Микроволновые датчики, работающие в диапазоне 5 ГГц, встроенные в портативные устройства типа микроволновой «кожи» для мониторинга показателей здоровья спортсмена в реальном времени – один из таких примеров. Такой подход позволяет создать мобильные и компактные системы для мониторинга лактата в поте, что будет полезно для автоматизированного контроля эффективности тренировок спортсменов.

Ключевые слова: *носимые сенсоры; микроволновая сенсорика; микроволновая «кожа», лактат в поте, диапазон 5 ГГц, пороговый датчик.*

Анализ чувствительности микроволнового датчика. Учитывая сдвиг резонансной частоты как главный выходной параметр датчика, чувствительность можно определить, как величину изменения этой частоты при изменении диэлектрической проницаемости исследуемого материала определённого объёма. На рис. 1 видно, что исследуемый нами микроволновый кольцевой датчик со щелью [1, 2] обладает приемлемой чувствительностью при изменении диэлектрической проницаемости исследуемого материала от 1 до 10. Исследуемый материал смоделирован в форме квадрата и имеет толщину 0.5 мм.

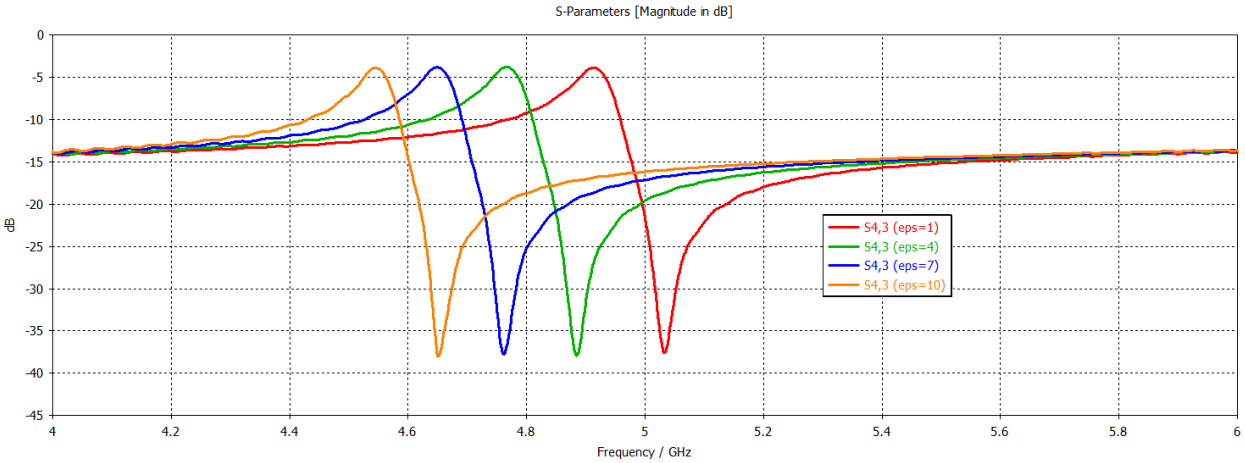


Рис. 1 – Коэффициенты передачи датчика без метки при изменении диэлектрической проницаемости исследуемого материала от 1 до 10

Для передачи информации на частоте 5 ГГц расположим метку. Чувствительность исследуемого датчика с меткой останется такой же (рис. 2).

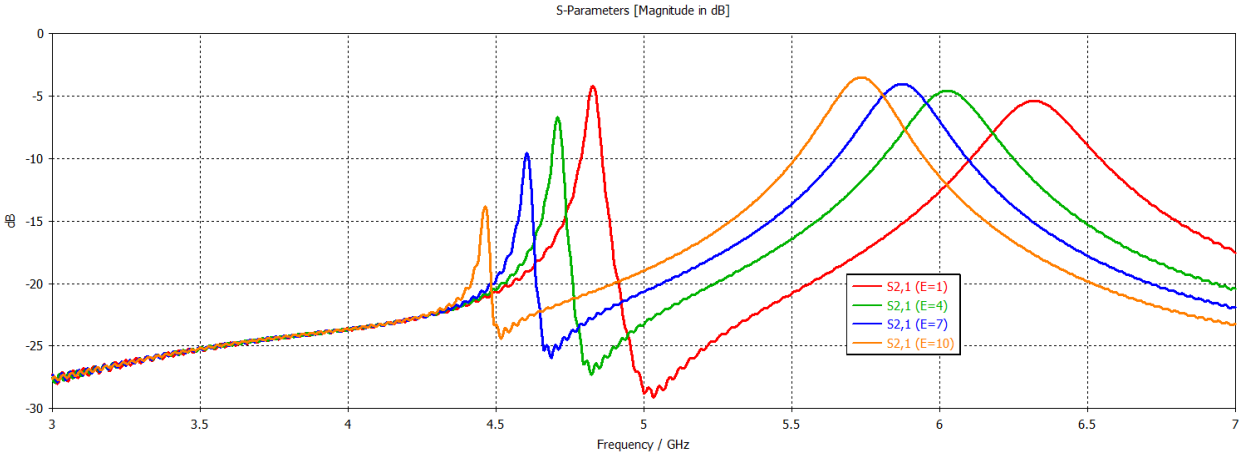


Рис. 2 – Коэффициенты передачи датчика с меткой при изменении диэлектрической проницаемости исследуемого материала от 1 до 10

Сравнивая полученные результаты, построим график для сдвига частоты в результате изменения относительной диэлектрической проницаемости от 1 до 10 для предлагаемого датчика. Чувствительность датчика с меткой составит около 510 МГц, а обычного датчика – 475 МГц на единицу диэлектрической проницаемости (рис. 3).

Анализ работы датчика в исследуемой среде. Для начала определим диэлектрические параметры молочной кислоты.

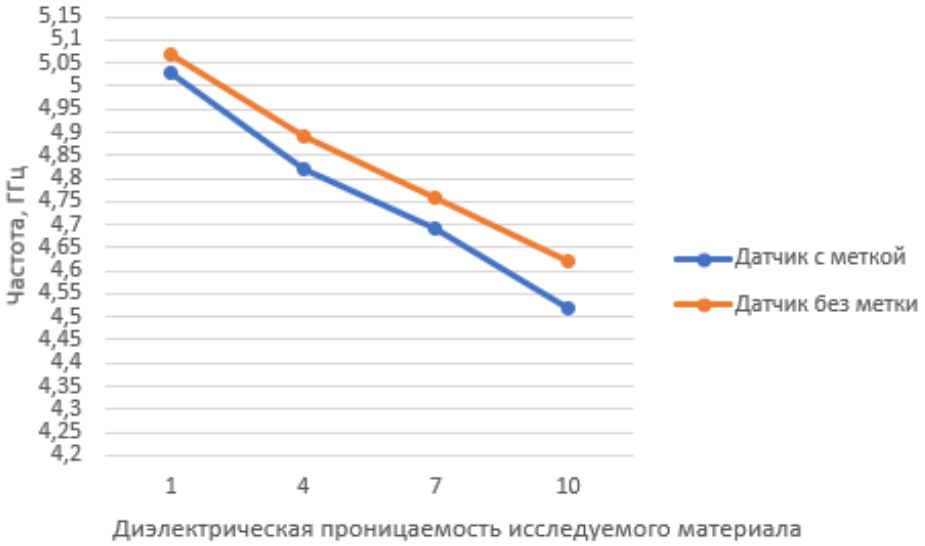


Рис. 3 – График зависимости диэлектрической проницаемости исследуемого материала от частоты

Молочная кислота в чистом виде имеет диэлектрическую проницаемость 22. В ходе компьютерного моделирования исследуемый материал задавался как слой диэлектрика с соответствующими параметрами, который соприкасался напрямую с меткой. Результат моделирования коэффициента передачи при моделировании процесса измерения диэлектрической проницаемости молочной кислоты показан на рис. 4.

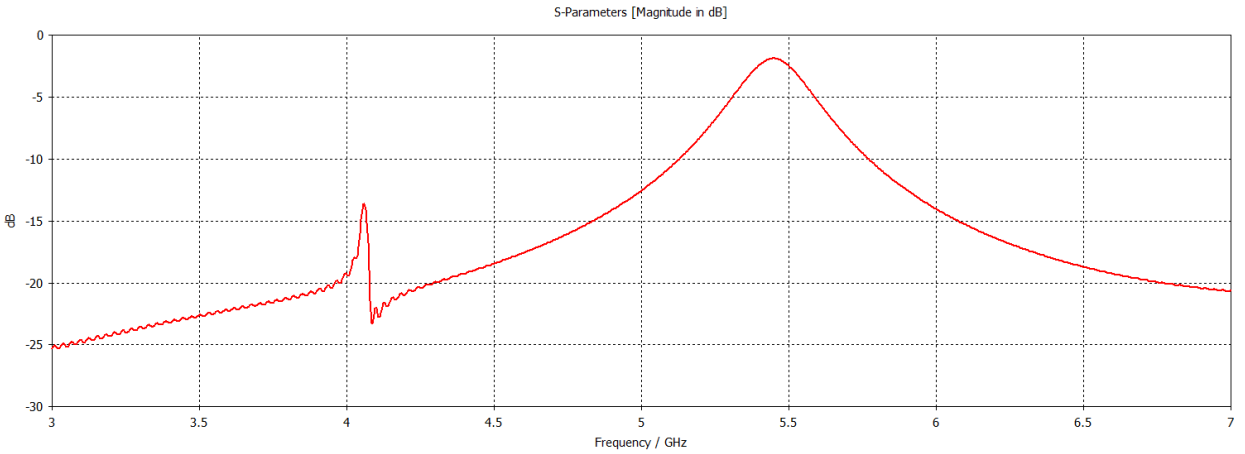


Рис. 4 – Коэффициент передачи датчика при нагружении молочной кислотой

Видно, что резонанс перемещается в область 4 ГГц. Поскольку нас интересует молочная кислота в поте [3, 4], проведем расчеты для определения диэлектрической проницаемости материала при разной объемной доли молочной кислоты в поте. Для расчета диэлектрической проницаемости раствора необходимо знать объемную долю включенных веществ и значения их диэлектрических проницаемостей. Объемная доля молочной кислоты в поте варьируется от 0.3% до 0.8% в зависимости от нагрузок. В состоянии покоя и при незначительных нагрузках это 0.3% или 1 – 4 мМоль/л, при незначительной мышечной усталости 0.6% или 5 – 20 мМоль/л, и при критической концентрации 0.8% или 21 – 25 мМоль/л.

Были использованы следующие значения диэлектрической проницаемости: для молочной кислоты $\varepsilon_1 = 22$, соли $\varepsilon_2 = 6.3$, воды $\varepsilon_3 = 81$.

Используем известную формулу для вычисления диэлектрической проницаемости раствора

$$\varepsilon_z = \theta_1 * \varepsilon_1 + \theta_2 * \varepsilon_2 + \cdots + \theta_n * \varepsilon_n, \quad (1)$$

где ε_z – эффективное значение диэлектрической проницаемости раствора; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_n$ – относительные диэлектрические проницаемости компонентов; $\theta_1, \theta_2, \theta_n$ – объёмные доли компонентов.

Подставим все известные значения в (1) и получим следующие результаты:

$$\varepsilon_z(0.3\%) = 0.003 * 22 + 0.01 * 6.3 + 0.98 * 81 = 79.51, \quad (2)$$

$$\varepsilon_z(0.6\%) = 0.006 * 22 + 0.01 * 6.3 + 0.98 * 81 = 79.58, \quad (3)$$

$$\varepsilon_z(0.8\%) = 0.008 * 22 + 0.01 * 6.3 + 0.98 * 81 = 79.62. \quad (4)$$

В результате получим для коэффициента передачи датчика результаты, представленные на рис. 5.

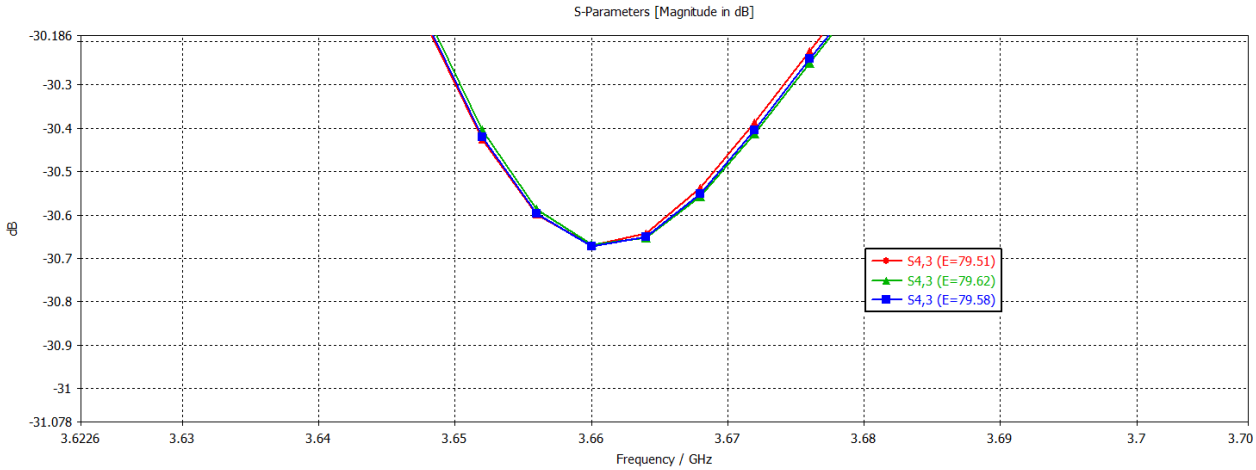


Рис. 5 – Коэффициенты передачи датчика для исследуемых растворов с диэлектрической проницаемостью 79.51; 79.58 и 79.62

Заключение. После анализа рис. 5 можно сделать вывод о том, что данный датчик не способен реагировать на такие незначительные изменения диэлектрической проницаемости. На частоте 5 ГГц электромагнитные волны сильнее поглощаются и рассеиваются в воде и биологических жидкостях, таких как пот. Это приводит к значительным потерям энергии, снижая амплитуду сигнала и ухудшая качество измерений. Датчики на 5 ГГц имеют меньшие размеры, чем датчики других диапазонов, например, 2.54 ГГц, что уменьшает объём электромагнитного поля и площадь взаимодействия с исследуемым материалом, а также снижает чувствительность. В совокупности эти факторы ограничивают эффективность применения датчиков на 5 ГГц в задачах, требующих высокой чувствительности, таких как определение молочной кислоты в поте. В связи с этим дальнейшие исследования необходимо проводить для датчиков других диапазонов.

Данный датчик может быть использован лишь как сигнальный, при появлении резонанса в области 3.65-3.67 ГГц, что будет свидетельствовать о появлении лактата в поте спортсмена. При этом может быть построена квазираспределенная система датчиков, сопряженная с волоконными датчиками, более чувствительными к исследуемому раствору по принципам построения, изложенным в близких работах [5-7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

Список литературы

1. *Falcone F., Lopetegi T., Baena J.D. et al.* Effective negative-ε stopband microstrip lines based on complementary split ring resonators // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. 2004. № 14. P. 280-282.
2. *Boybay M.S. and Ramahi O.M.* Material characterization using complementary split-ring resonators // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2012. № 61. P. 3039–3046.
3. *Zhihao Zhuang, Xiuwei Xuan, Hongji Li, et al.* A wearable antenna sensor based on ePDA/SiO2 nanowalls for the detection of lactic acid in sweat // Sensors and Actuators B: Chemical. 2024. Vol. 404. P. 135265.
4. *Zhang C., Xiao P., Zhao Z.T., et al.* A wearable localized surface plasmons antenna sensor for communication and sweat sensing // IEEE Sens. J. 2023. Vol. 23. P. 11591–11599.
5. *Кувшинов Н.Е. и др.* Радиофотонная система бесконтактного измерения распределения температур в обрабатываемом материале в условиях закрытой рабочей камеры лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2023. Т. 3. № 1. С. 56-81.
6. *Кувшинов Н.Е. и др.* Квазираспределенная волоконно-оптическая сенсорная сеть для контроля распределения интенсивности ЭМП и температуры в закрытой рабочей СВЧ-камере модернизированным калориметрическим методом // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2. № 2. С. 56-81.

2.3.3.

Д.Е. Абрамов, П.С. Петухов, О.Г. Морозов,
И.И. Нуреев, Р.А. Юсупов, Ш.Р. Юсупов, А.Л. Овчинников

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ,
кафедра радиофотоники и микроволновых технологий,
кафедра физической культуры и спорта, кафедра спортивной инженерии,
НИИ прикладной электродинамики, фотоники и живых систем,
НИИ медико-биологической и спортивной инженерии,
Казань, OGMorozov@kai.ru

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДАТЧИКА ДИАПАЗОНА 2,45 ГГЦ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛАКТАТА В ПОТЕ СПОРТСМЕНА

Частота 2.45 ГГц является стандартом для различных беспроводных систем, включая Wi-Fi, Bluetooth и устройства для связи на короткие расстояния. Это делает её удобной для интеграции в существующие мобильные и портативные устройства, что важно для создания компактных и мобильных датчиков. Сигналы этой частоты могут достаточно глубоко проникать в кожу и пот, что позволяет проводить измерения с поверхности кожи, не требуя инвазивного вмешательства. При этом разрешающая способность остаётся достаточно высокой для точных измерений.

Ключевые слова: *носимые сенсоры; микроволновая сенсорика; лактат в поте; диапазон 2,45 ГГц; микроволновая «кожа».*

Разработка микроволнового датчика диапазона 2,45 ГГц. В ходе оптимизации было выполнено моделирование большого количества вариантов изменения геометрических параметров микроволнового резонатора со щелью [1, 2] в частотном диапазоне от 1 до 4 ГГц. После анализа полученных данных и рассмотрения различных моделей был выбран вариант, который наилучшим образом соответствовал заданным требованиям и критериям эффективности. Этот оптимальный вариант характеризуется наиболее высоким и стабильным коэффициентом передачи (рис. 1), что обеспечивает качественную работу устройства и высокую чувствительность.

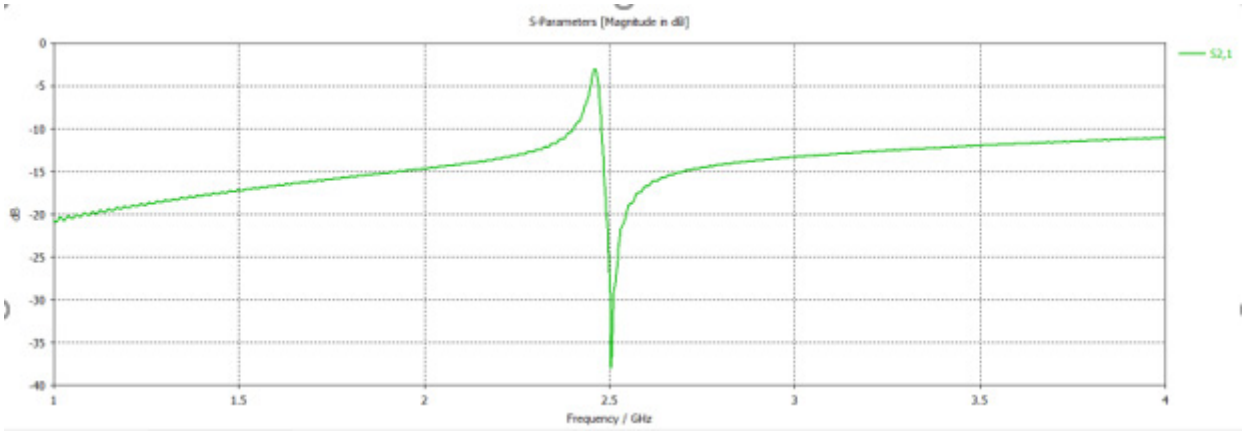


Рис. 1 – Коэффициент передачи оптимизированного датчика на 2.45 ГГц

Сравнивая результаты с датчиками диапазона 5 ГГц видны существенные отличия, например выраженность резонанса, а также добротность.

Сравнивая геометрические параметры данного датчика с геометрическими параметрами датчика, работающего на 5 ГГц, можно заявить, что увеличение длины и ширины прямоугольного кольцевого резонатора приводит к снижению резонансной частоты, так как

увеличивается электрическая длина пути распространения волн внутри резонатора. Широкий резонатор создает более широкое электромагнитное поле, что может увеличить чувствительность к изменениям диэлектрических свойств окружающей среды, улучшая работу датчика.

Обратим внимание на концентрацию электромагнитного поля на рис. 2. Видно, что концентрация поля в зоне обнаружения у датчика без метки, работающего на частоте 2.45 ГГц гуще, чем у датчика с резонансной частотой 5 ГГц.

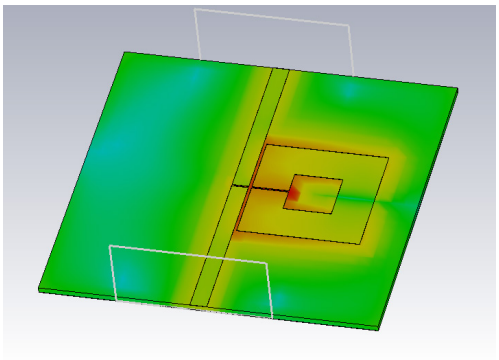


Рис. 2 – Концентрация электрического поля при возбуждении кольцевого СВЧ –резонатора без метки на частоте 2.45 ГГц

Далее рассмотрим коэффициенты передачи для датчика с меткой, работающего на частоте 2.45 ГГц при изменении расстояния между считывателем и меткой (рис. 3).

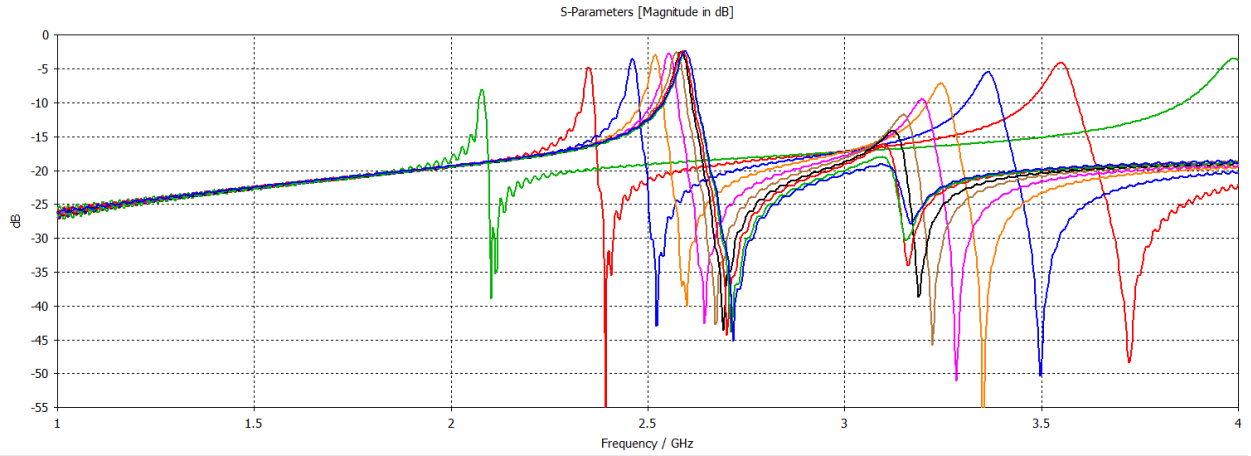


Рис. 3 – Коэффициенты передачи при изменении расстояния между считывателем и меткой от 1 мм до 10 мм

Исходя из рис. 3, считыватель может располагаться на расстоянии 10 мм при практически нулевой мощности. Оптимальное расстояние между считывателем и меткой равное 3 мм.

Исследование чувствительности датчика при контроле лактата в поте. Исследуем и проанализируем зависимость частотного сдвига от значения диэлектрической проницаемости исследуемого материала для датчика без метки и датчика с меткой, работающих на частоте 2.45 ГГц

По зависимости, изображенной на рис. 4 видно, что чувствительность исследуемого датчика в 3.1 раз больше по сравнению с датчиком без метки.

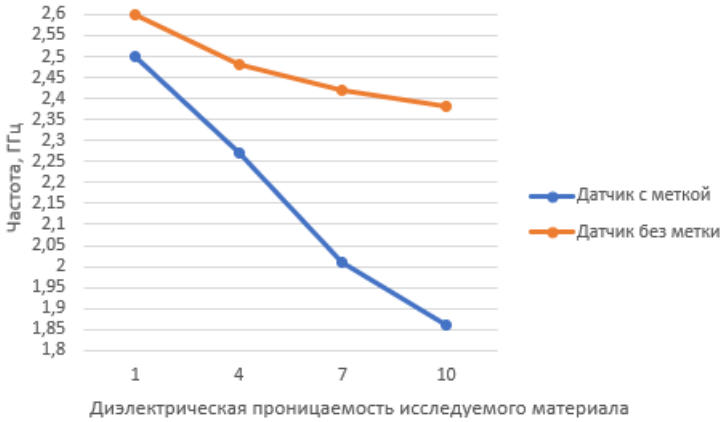


Рис. 4 – График зависимости диэлектрической проницаемости исследуемого материала от частоты

Сравнивая полученные результаты, видно, что сдвиг частоты в результате изменения относительной диэлектрической проницаемости от 1 до 10 для предлагаемого датчика составляет около 690 МГц, а обычного датчика – 220 МГц на единицу диэлектрической проницаемости.

Результаты измерения концентрации молочной кислоты. Для начала также проведем исследование с молочной кислотой в чистом виде. Результаты моделирования коэффициента передачи при оценке диэлектрической проницаемости молочной кислоты показаны на рис. 5.

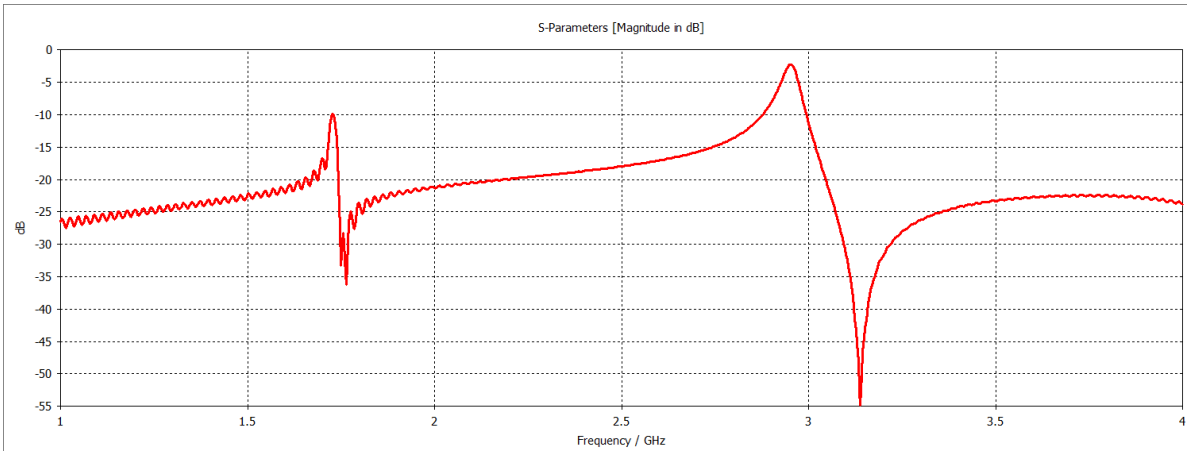


Рис. 5 – Коэффициенты передачи датчика для исследуемого материала с диэлектрической проницаемостью 22

У датчика имеются незначительные шумы и помехи, но они ни коем образом не влияют на результат. Исследуем растворы с концентрацией лактата 0,3, 0,6 и 0,8% [3, 4]. Коэффициент передачи датчика показан на рис. 6.

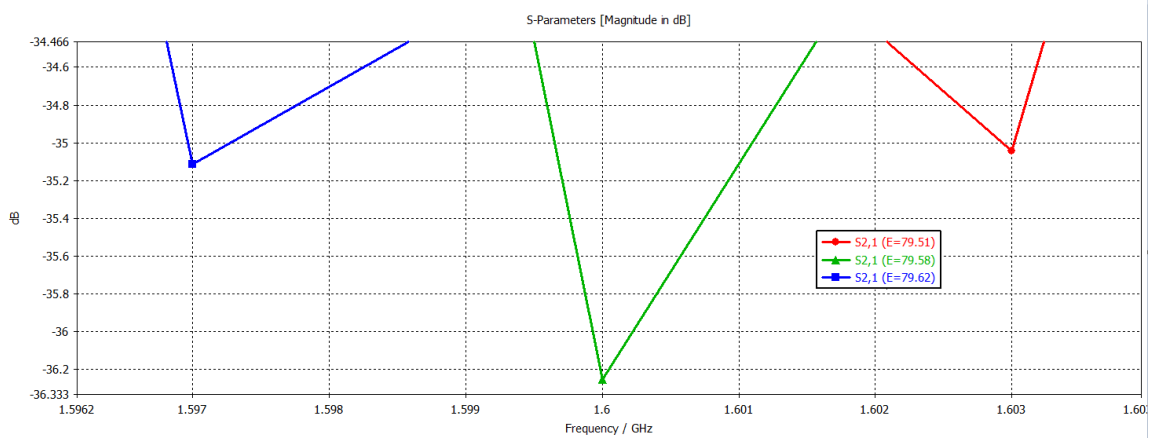


Рис. 6 – Коэффициенты передачи датчика для исследуемого материала с диэлектрической проницаемостью 79.51; 79.58;79.62

Увеличение концентрации молочной кислоты в поте вызывает рост диэлектрической проницаемости, что, в свою очередь, приводит к изменению частотного сдвига. Рис. 7 демонстрирует, что собранный датчик улавливает даже мельчайшее изменение концентрации молочной кислоты.

Рис. 7 – Полученная зависимость концентрации молочной кислоты от частоты

Заключение. Полученные результаты показали, что сдвиг резонансной частоты составляет 240 МГц/мМоль/л. Данное значение говорит о возможности дальнейшего исследования микроволнового датчика в области мониторинга уровня лактата в поте для изготовления микроволновой «кожи» на их основе и применения ее в тренировочном процессе спортсменов. При этом могут быть использованы радиофотонные технологии [5, 6].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

Список литературы

1. *Falcone F., Lopetegi T., Baena J.D. et al.* Effective negative-ε stopband microstrip lines based on complementary split ring resonators // IEEE Microw. Wireless Compon. Lett. 2004. № 14. P. 280-282.
2. *Boybay M.S., Ramahi O.M.* Material characterization using complementary split-ring resonators // IEEE Trans. Instrum. Meas. 2012. № 61. P. 3039–3046.
3. *Zhihao Zhuang, Xiuwei Xuan, Hongji Li, et al.* A wearable antenna sensor based on ePDA/SiO2 nanowalls for the detection of lactic acid in sweat // Sensors and Actuators B: Chemical. 2024. Vol. 404. P. 135265.
4. *Zhang C., Xiao P., Zhao Z.T., et al.* A wearable localized surface plasmons antenna sensor for communication and sweat sensing // IEEE Sens. J. 2023. Vol. 23. P. 11591–11599.
5. *Кувшинов Н.Е. и др.* Радиофотонная система бесконтактного измерения распределения температур в обрабатываемом материале в условиях закрытой рабочей камеры лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2023. Т. 3. № 1. С. 56-81.
6. *Кувшинов Н.Е. и др.* Квазираспределенная волоконно-оптическая сенсорная сеть для контроля распределения интенсивности ЭМП и температуры в закрытой рабочей СВЧ-камере модернизированным калориметрическим методом // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2. № 2. С. 56-81.

2.3.3.

А.Э. Аксенов, А.А. Кузнецов, Р.М. Зайнутдинов,
А.В. Михеев, В.Ю. Дубровин, Е.А. Селюков, И.И. Нуреев

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ,
кафедра радиофотоники и микроволновых технологий,
Казань, OGMorozov@kai.ru

РАДИОФОТОННЫЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ СЕНСОРНЫХ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Оптические сигналы многофотонного и квантового уровня, генерируемые оптическими передатчиками, состоящими из лазеров и широкополосных модуляторов, преобразуются в электрические сигналы широкополосными фотодетекторами (ШФД). Как правило, в системах мониторинга спектральных характеристик (относительных АЧХ) элементов указанного класса, применяются гетеродинные, многоуровневые и многокаскадные модуляторные схемы с управлением и регистрацией на электронных векторных анализаторах цепей (ЭВАЦ). Однако их структуры достаточно сложны, дорогостоящи и требуют, как улучшения метрологических характеристик, так и структурной минимизации. В частности, самым дорогостоящим элементом этих устройств может быть и сам ЭВАЦ. В настоящей статье рассмотрены вопросы построения радофотонного анализатора относительных АЧХ, построенного на принципах радиофотонного интеррогатора для опроса датчиков сенсорных сетей с волновым откликом.

Ключевые слова: *широкополосный фотодетектор; относительная АЧХ; электронный векторный анализатор цепей; радиофотонный интеррогатор; радиофотонный анализатор.*

Введение. Эффективность преобразования радиофотонного зондирующего излучения в ШФД может быть получена из отношения между его оптической мощностью и электрической мощностью одночастотного радиосигнала биений между его компонентами, получаемыми в ШФД. Когда коэффициент экстинкции калиброванного модулятора достаточно велик, спектральный профиль радиофотонного зондирующего излучения не зависит от частотной характеристики модулятора. Таким образом, контролируя или стабилизируя мощность радиофотонного зондирующего излучения мы можем измерять АЧХ ШФД [1].

ШФД, частотная характеристика которых откалибрована, могут использоваться в свою очередь для определения характеристик оптических пе-редатчиков – в первую очередь модуляторов на рабочей длине волны, во вто-рую – на разных рабочих длинах волн. И наоборот, модуляторы, откалибро-ванные с помощью зондирующего радиофотонного излучения, могут быть использованы для многодиапазонного исследования АЧХ ШФД.

Структурная схема и принцип работы. На рис. 1 представлена структурная схема радиофотонного анализатора спектральных характеристик (РФАСХ) ШФД с радиофотонной обработкой зондирующих сигналов [2].

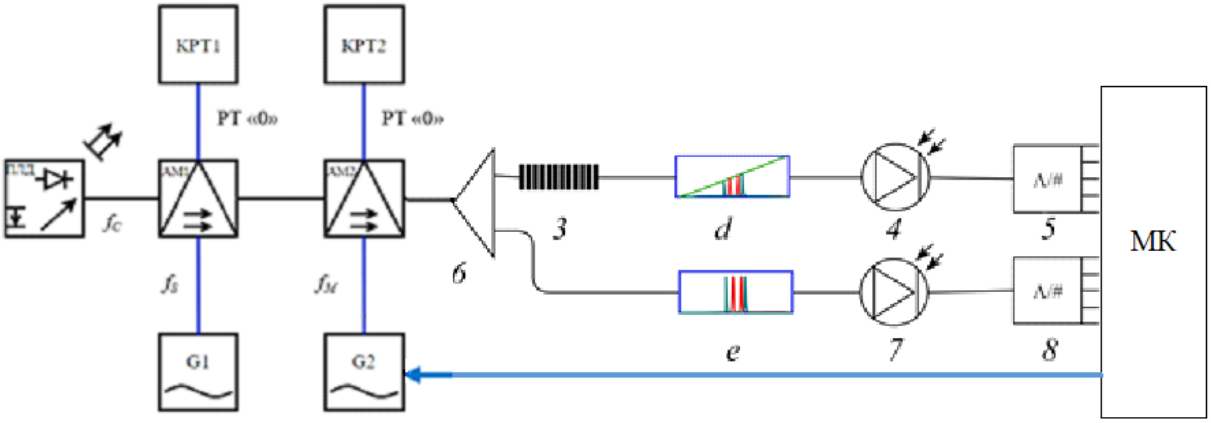


Рис. 1. Структурная схема РФАСХ ШФД:
3 – оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой (ОФНЛХ); 4 – широкополосный тестируемый фотоприемник (ШФД); 5, 8 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 6 – оптический разветвитель, 7 – калиброванный ШФД

В отличие от схемы РФАСХ, представленной на рис. 1, радиофотонное двухполосное двухчастотное зондирующее излучение (ДДЗИ) через оптический разветвитель ОР поступает на оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой ОФНЛХ и далее на тестируемый ШФД. Диапазон рабочих частот ОФНЛХ перекрывает весь рабочий диапазон частот ШФД. С выхода ШФД сигнал биений составляющих частот ДДЗИ, поступает на АЦП и микроконтроллер МК для вычисления АЧХ ШФД. В свою очередь МК управляет и генераторами частот G1 и G2. Нижний канал схемы представляет собой подсистему мониторинга мощности ПЛД, существенно влияющую на точность измерений.

Для пояснения принципов радиофотонной обработки ДДЗИ на рис. 2 представлены спектрограммы оптических излучений на входе и выходе ОФНЛХ.

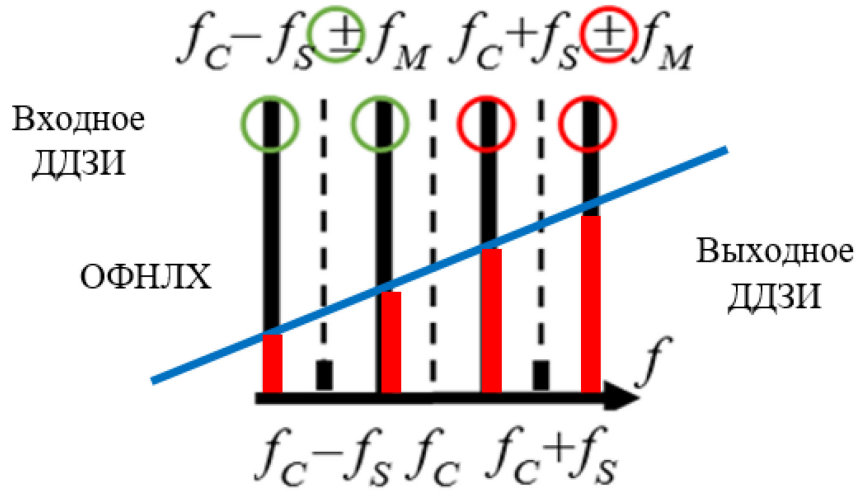


Рис. 2 - Спектрограммы ДДЗИ на входе и выходе ОФНЛХ

Таким образом, все амплитуды спектральных составляющих ДДЗИ на выходе ОФНЛХ лежат на одной прямой:

$$L(f) = kf + b, \quad (1)$$

которая описывает параметры АЧХ фильтра.

Сигнал ДДЗИ на выходе ОФНЛХ можно записать как набор для условных дельта функций с конечной амплитудой:

$$E_1(f_C - f_S - f_M) = E_C L(f_C - f_S - f_M) J_{-1}(\beta_1) J_{-1}(\beta_2) \delta(f - f_C + f_S + f_M), \quad (2)$$

$$E_2(f_C - f_S + f_M) = E_C L(f_C - f_S + f_M) J_{-1}(\beta_1) J_1(\beta_2) \delta(f - f_C + f_S - f_M), \quad (3)$$

$$E_3(f_C + f_S - f_M) = E_C L(f_C + f_S - f_M) J_1(\beta_1) J_{-1}(\beta_2) \delta(f - f_C - f_S + f_M), \quad (4)$$

$$E_4(f_C + f_S + f_M) = E_C L(f_C + f_S + f_M) J_1(\beta_1) J_1(\beta_2) \delta(f - f_C - f_S - f_M). \quad (5)$$

После детектирования в тестируемом ШФД получим фототок:

$$\begin{aligned} i(t) = {} & \Re(f) \times \left[E_1(\cdot) + \ldots + E_4(\cdot) \right] \times \left[E_1(\cdot) + \ldots + E_4(\cdot) \right]^* \propto \\ \propto {} & \Re(0) \times \left[E_1^2(\cdot) + E_2^2(\cdot) + E_3^2(\cdot) + E_4^2(\cdot) \right] + \\ & + 2\Re(2f_M) \times \left[E_1(\cdot) E_2(\cdot) + E_3(\cdot) E_4(\cdot) \right] \cos(4\pi f_M t) + \\ & + 2\Re(2f_S) \times \left[E_1(\cdot) E_3(\cdot) + E_2(\cdot) E_4(\cdot) \right] \cos(4\pi f_S t) + \\ & + 2\Re(2f_S + 2f_M) \times \left[E_1(\cdot) E_4(\cdot) \right] \cos(2\pi(2f_S + 2f_M)t) + \\ & + 2\Re(2f_S - 2f_M) \times \left[E_2(\cdot) E_3(\cdot) \right] \cos(2\pi(2f_S - 2f_M)t), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Re(f)$ – искомая АЧХ ШФД, $\Re(0)$ – отклик ШФД на постоянной составляющей. Сигнал на выходе ШФД содержит постоянную составляющую и сумму колебаний на четырех разностных частотах.

Обработка сигнала. Полученные компоненты биений (6) выделяются программно с помощью полосового фильтра $F(f_F, f)$, построенного на основе функции нормального распределения за исключением нормирующего множителя, чтобы функция полосового фильтра почти везде равнялась нулю, за исключением окрестности точки f_F, где она равна единице: $F(f_F, f_F) = 1$, и $F(f_F, f) = 0$ при $f \neq f_F$:

$$F(f_F, f) = \exp^{\left(-\frac{(f - f_F)^2}{2\sigma^2} \right)}, \quad (7)$$

где f_F – частота фильтрации; σ – добротность фильтра.

Тогда определенные при особых условиях и вычисленные после сканирования составляющие фототока можно определить, как:

$$I(2f_S) \sim \sqrt{2} \alpha \Re^2(2f_S), \quad (8)$$

$$I(2f_S - 2f_M) = \left(\sqrt{2}\right)^{-1} \alpha \Re(2f_S - 2f_M), \quad (9)$$

$$I(2f_S + 2f_M) = \left(\sqrt{2}\right)^{-1} \alpha \Re(2f_S + 2f_M), \quad (10)$$

а по мощности

$$P(2f_S) \sim 2\Re^2(2f_S) R_{\text{ШФД}}, \quad (11)$$

$$\Re(2f_S - 2f_M) \sim \sqrt{\frac{P(2f_S - 2f_M)}{P(2f_S)}}, \quad (12)$$

$$\Re(2f_S + 2f_M) \sim \sqrt{\frac{P|2f_S + 2f_M|}{P(2f_S)}}, \quad (13)$$

где $R_{\text{ШФД}}$ – нагрузка тестируемого фотоприемника, (11) – мощность тестируемого фотоприемника на частоте $2f_S$, при $f_S = f_M$, (12) – отклик тестируемого фотоприемника на частотах f_M, принадлежащих диапазону от 0 до $2f_S$, (13) – отклик тестируемого фотоприемника на частотах f_M, принадлежащих диапазону от $2f_S$ до $2f_M$.

Заключение. Из (11)-(13) видно, что полученный относительный спектральный отклик тестируемого ШФД может быть измерен с помощью предложенного метода, заключающегося в формировании ДДЗИ с подавленной несущей и фиксированном разносе полос на $2f_S$, разовом сканировании по f_M характеристики ШФД и регистрации информационных сигналов на частотах биений их компонент в фотодетекторе с самокалибровкой по заданной частоте f_S.

В отличие от существующих устройств достигнута упрощенная структура анализатора на базе двух универсальных модуляторов и фотодетектора, что делает наши измерения экономически эффективными для практического применения. Кроме того, каскадированное получение ДДЗИ с двухэтапным подавлением несущей, позволяет получать информацию без каких-либо предположений о слабом сигнале и применим для различных уровней зондирования и рабочих длин волн [3-5]. АЧХ на радиочастотах были получены из мощности продуктов биений компонент ДДЗИ, соотнесенных к значениям мощности калиброванных частот.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

Список литературы

1. *Аль-Муфти А.М. и др.* Комбинированное применение основ широкополосного и сверхузкополосного пакетов дискретных частот для создания компактных радиофотонных анализаторов спектральных характеристик широкополосных амплитудных модуляторов Маха-Цендера и фотодетекторов. Часть I. Симметричное двухполосное многочастотное зондирующее излучение // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2024. Т. 4. № 4. С. 43-58.

2. *Аль-Муфти А.М. и др.* Комбинированное применение основ широкополосного и сверхузкополосного пакетов дискретных частот для создания компактных радиофотонных анализаторов спектральных характеристик широкополосных амплитудных модуляторов Маха-Цендера и фотодетекторов. Часть II. Радиофотонный интеррогатор // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2024. Т. 4. № 4. С. 68-82.

3. *Аль-Муфти А.М. и др.* Комбинированное применение основ широкополосного и сверхузкополосного пакетов дискретных частот для создания компактных радиофотонных анализаторов спектральных характеристик широкополосных амплитудных модуляторов маха-цендера и фотодетекторов. Часть III. Радиофотонный анализатор спектральных характеристик широкополосных фотодетекторов на основе многочастотного зондирующего излучения, полученного умножением частоты // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2025. Т. 5. № 1. С. 45-53.

4. *Аль-Муфти А.М. и др.* Комбинированное применение основ широкополосного и сверхузкополосного пакетов дискретных частот для создания компактных радиофотонных анализаторов спектральных характеристик широкополосных амплитудных модуляторов маха-цендера и фотодетекторов. Часть IV. Радиофотонный анализатор спектральных характеристик широкополосных амплитудных модуляторов маха-цендера на основе двухполосного четырехчастотного зондирующего излучения, полученного умножением сплиттированной сканирующей частоты // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2025. Т. 5. № 1. С. 54-63.

5. *Аль-Муфти А.М. и др.* Широкополосные и сверхузкополосные пакеты дискретных частот для решения задач спектральной настройки восходящих каналов волоконно-оптических транспортных доменов сетей доступа мобильной связи 5G+ // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2025. Т. 5. № 1. С. 64-89.

2.3.3.

[1]Р.И. Алексеев, [1]И.И. Нуреев, [1,2]С.Н. Нигматуллин,
[1,2]А.А. Потанин, [1]Э.М. Шарафутдинов, [2]Т.Р. Гизатуллин, [1]Г.Ж. Нуреева

[1]Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ,
кафедра радиофотоники и микроволновых технологий,
[2]АО «КПКБ», Казань, OGMorozov@kai.ru

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ НАГРЕВА В ТЕРМОАНЕМОМЕТРАХ СКОРОСТИ ПОТОКА В ТРУБОПРОВОДАХ

Среди множества, существующих на сегодняшний день методов измерения скоростей потоков газов и жидкостей, можно выделить крупные группы, принципы работы которых, заложены в большинстве устройств, выпускаемых на данный момент. В литературе представлены различные типы анемометров и велосиметров — устройств, предназначенных для измерения скоростей потоков газов и жидкостей. При этом многие методики могут применяться как для одного, так и для другого типа среды. В дальнейшем в данной работе под анемометрами будут пониматься приборы, используемые для измерения скоростей потоков жидкости и газов (тепловые анемометры типа «с горячей проволокой»). Для ряда сред прямой нагрев может быть невозможен. В работе рассмотрены волоконно-оптические анемометры с опосредованным нагревом волокна.

Ключевые слова: *трубопровод; скорость потока; волоконная сенсорика; термоанемометр; опосредованный нагрев.*

Введение. При прямом нагреве используется металлическая нить, по которой проходит электрический ток, вызывая её нагрев. При размещении нити в потоке происходит охлаждение, и с увеличением скорости потока температура и сопротивление нити снижаются, что позволяет оценивать скорость потока по величине тока. Однако у металлических нити есть значительные недостатки: окисление и коррозия металлов в процессе эксплуатации; электромагнитная восприимчивость, влияющая на точность измерений.

Переходный метод основан на нагреве среды СВЧ-излучением [1, 2], однако также ограничен в применении к отдельным перекачиваемым по трубе материалам.

В связи с этими ограничениями для определения скорости потока стали использовать оптоволоконные температурные сенсоры, такие как волоконные брэгговские решётки, позволяющие измерять тепловые потери нагревательного элемента, обеспечивая более надежные и точные результаты.

Волоконно-оптическая сенсорика. Среди волоконно-оптических анемометров выделяются методы, аналогичные принципу горячей проволоки. В исследовании [3] была предложена конструкция волоконно-оптического термоанемометра, основанного на наклонной волоконной брэгговской решетке, покрытой одностенными углеродными нанотрубками. Схематическое изображение экспериментальной установки представлено на рис. 1,*а*, а чувствительный элемент показан на рис. 1,б.

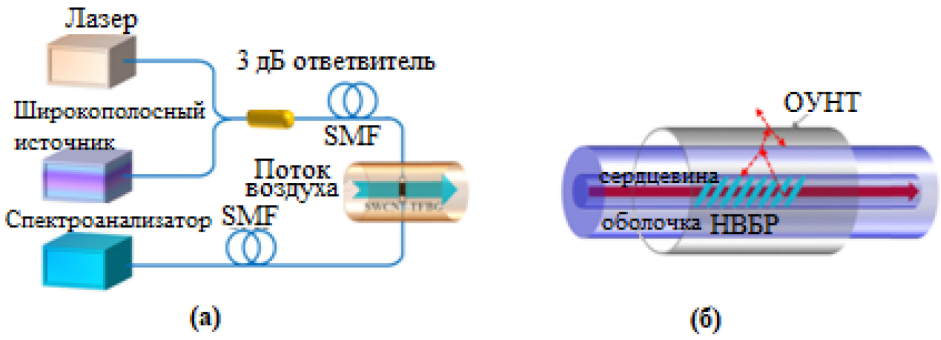


Рис. 1 - Схематическое изображение системы волоконно-оптического анемометра, использующего наклонную волоконную брэгговскую решетку, покрытую одностенными углеродными нанотрубками (а); чувствительный элемент и принцип его работы [3]

В данной работе наклонная волоконная брэгговская решетка (ВБР) используется как для вывода излучения, так и в качестве элемента, чувствительного к температуре, что устраняет необходимость в дополнительной модификации конструкции или создании отдельной выводящей структуры, тем самым упрощая дизайн датчика. Для преобразования оптического излучения в тепло на поверхность наклонной ВБР было нанесено покрытие из одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ). Когда лазерное излучение, распространяющееся по сердцевине волокна, достигает наклонной ВБР, часть этого излучения выводится в оболочку и поглощается тонкой пленкой ОУНТ.

Это поглощение функционирует как горячая проволока, локально повышая температуру волокна, что приводит к смещению длины волны брэгговского резонанса наклонной ВБР. Разработанный анемометр продемонстрировал эффективность поглощения света до 93%, а максимальная температура локального участка волокна достигала 146,1°C при относительно низкой мощности накачки в 97,76 мВт. Чувствительность составила -0,3667 нм/(м/с) при скорости ветра 1,0 м/с для угла наклона ВБР 12° и толщины пленки 1,6 мкм.

Похожие результаты были также представлены авторами в [4-5], в которых проводились дальнейшие исследования по созданию ассиметричного нанесения ОУНТ, применения наклонной ВБР под углом 45°. В частности, авторы представили еще одну разновидность устройства для измерения скорости потока с использованием наклонных ВБР, где при входной мощности лазера накачки 29,3 мВт было получено значение R^2 (линейная аппроксимация) 0,9927 с чувствительностью 7,425 дБм/(м/с) и разрешением 0,0027 м/с.

В [6] описан миниатюрный датчик для измерения потока жидкости, основанный на принципе волоконно-оптической тепловой анемометрии. Этот датчик использует ВБР, сформированную в одномодовом оптическом волокне, которое нагревается многомодовыми волокнами, легированными Co_{2+}. Изображение данного датчика можно увидеть на рис. 2.

Для создания датчика была сформирована ВБР длиной 3 мм в стандартном одномодовом волокне SMF-28. Нагревательный элемент был изготовлен из участка многомодового волокна (MMF), легированного кобальтом (Co_{2+}), с диаметром сердцевины 50 мкм и оболочки 125 мкм, который затем соединялся с обычным многомодовым волокном.

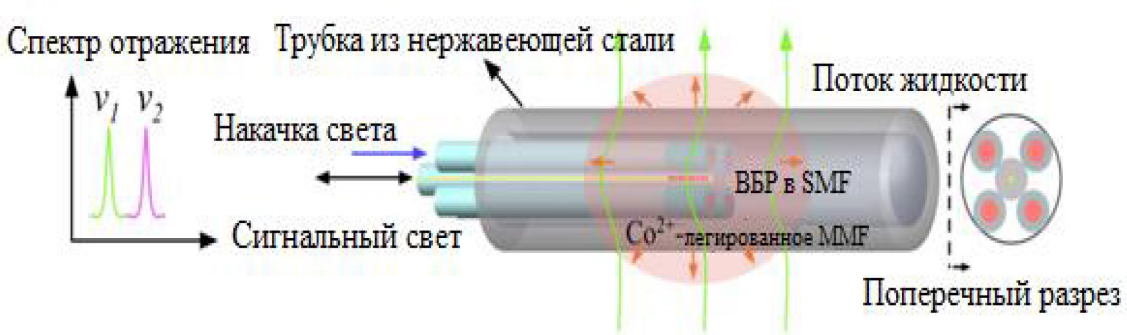


Рис. 2 - Схематическое представление датчика для измерения потока жидкости, использующего ВБР и нагревательные элементы из легированных многомодовых волокон [6]

Конструкция датчика включает одномодовое волокно с ВБР, окруженное четырьмя идентичными многомодовыми волокнами, легированными Co_{2+}. Все пять волокон были помещены в трубку из нержавеющей стали с внутренним диаметром 380 мкм и внешним диаметром 500 мкм. При подключении лазера накачки к многомодовым волокнам излучение распространяется по ним до участка с легированными Co2+ волокнами, где происходит вывод излучения, что приводит к нагреву трубки и ВБР. Промежутки между волокнами заполнены теплоотводом для равномерной передачи тепла и пространственной фиксации волокон. Разработанный датчик расхода применялся для измерения расхода нефти и воды, демонстрируя чувствительность 0,339 нм/(м/с) для воды и 0,578 нм/(м/с) для нефти при скорости V = 0,2 м/с, а также экспериментальные данные показывают, что датчик способен различать небольшие изменения скорости потока до 0,002 м/с.

Предлагаемое решение на основе вытравленной ВБР. На рис. 3 представлен схематический принцип измерения, при котором в измеряемую трубу встроены два датчика температуры на базе адресной волоконной брэгговской структуры (АВБС) [7] и модуль нагрева.

Для удобства работы АВБС и нагреваемый элемент сконструированы вместе. В нагревателе источник света ASE выдает постоянную мощность, при этом ее 80% P1 подается на нагреваемый элемент (участок вытравленного волокна), а остальная мощность P2 подается через радиофотонный адресный интеррогатор РФАИ на АВБС.

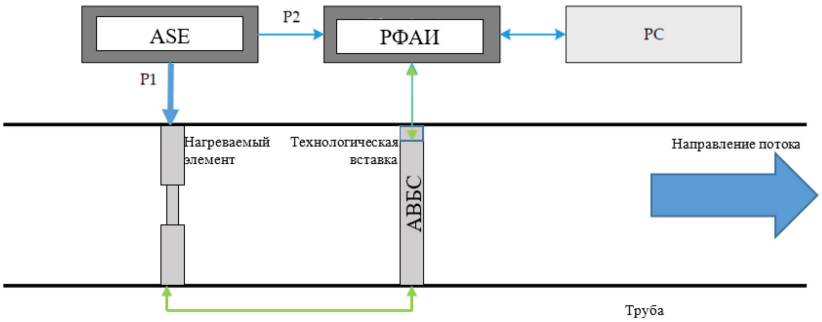


Рис. 3 – Схема ТМФ на основе АВБС

В вытравленном участке волокна также записана АВБС, которая измеряет температуру нагрева. Благодаря РФАИ разность температур от двух датчиков можно отслеживать в режиме реального времени. Когда в трубе нет потока газа, разница температур между датчиками наибольшая. Когда в трубе появляется поток газа, он начинает отбирать тепло от нагреваемого элемента и АВБС, что приводит к снижению в них температуры. Через короткое время температура перестает снижаться и становится постоянной, поскольку мощность нагрева и расход стабилизируются. Поэтому разность температур между двумя датчиками температуры достигает стабильного значения, меньшего, чем в случае отсутствия потока. Чем больше расход газа, тем меньше разница. Измерив разницу температур, можно определить расход в трубе. При использовании АВБС и РФАИ появляется возможность строить многосенсорные термоанемометры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

Список литературы

1. *Jiang X. et al.* Optical sensor of thermal gas flow based on fiber Bragg grating // Sensors. 2017. Vol. 17. P. 374.
2. *Njegovec M. et al.* Optical micro-wire flow-velocity sensor // Sensors. 2021. Vol. 21. P. 4025.
3. *Zhang Y., et al.* Fiber-optic anemometer based on single-walled carbon nanotube coated tilted fiber Bragg grating // Optics Express. 2017. V. 25. No. 20. P. 24521-24530.
4. *Zhang Y., et al.* A novel low-power-consumption all-fiber-optic anemometer with simple system design // Sensors. 2017. V. 17. P. 2107.
5. *Wang F., et al.* Fiber-optic hot-wire anemometer with directional response based on symmetry-breaking induced heat transfer mechanism // Journal of Lightwave Technology. 2021. V. 39(12). P. 3919-3925.
6. *Liu Z., et al.* Integrated microfluidic flowmeter based on a micro-FBG inscribed in Co2+-doped optical fiber // Optics Letters. 2014. V. 39(20). P. 5877-5880.
7. *Мисбахов Рус.Ш. и др.* Комбинированные двухкомпонентные многоадресные волоконные брэгговские структуры // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2024. № 2 (62). С. 77-90.

2.3.3.

[1]Р.И. Алексеев, [1]И.И. Нуреев, [1,2]С.Н. Нигматуллин,
[1]А.А. Силантьева, [1]Э.М. Шарафутдинов, [1]Т.Р. Гизатуллин, [1]Г.Ж. Нуреева

[1]Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ,
кафедра радиофотоники и микроволновых технологий,
[2]АО «КПКБ», Казань, OGMorozov@kai.ru

МНОГОСЕРДЦЕВИННЫЙ ОДНОВОЛОКОННЫЙ ТЕРМОАНЕМОМЕТР СКОРОСТИ ПОТОКА В ТРУБОПРОВОДАХ

Проведенный нами анализ позволил сформулировать общую и частные задачи разработки системы волоконно-оптического квази-распределенного контроля температуры для мониторинга скорости потока жидкости с целью построения новых систем обладающих преимуществами спектрального прямого контроля по ВБР. В области применяемых брэгговских структур в системе необходимо исследовать возможности замены ВБР на адресные волоконные брэгговские структур (АВБС), привязывающих показания температуры к конкретной точки волокна. Однако, АВБС как правило имеют большую длину, что ограничивает их применение как точечных датчиков. В работе рассмотрены волоконно-оптические анемометры на АВБС, которые записаны по отдельным компонентам в многосердцевинном волокне.

Ключевые слова: *трубопровод; скорость потока; волоконная сенсорика; термоанемометр; адресная волоконная брэгговская структура; многосердцевинное волокно.*

Введение. С ростом спроса на оптические коммуникации большой емкости, технология многосердцевинных волокон (МСВ) развивалась. МСВ и связанных с ними устройства становились все более совершенными. Применение МСВ в области сенсорики также привлекало все больше внимания. Среди сенсорных устройств получили большое внимание и широко используются в различных областях волоконных брэгговских решетки (ВБР), записанные в МСВ. В данной статье нами предложено записать АВБС в четырех сердцевинном волокне и использовать их в квазираспределенном термоанемометре скорости потока газа или жидкости в трубопроводе.

Устройство одноволоконного квази-распределенного анемометра на ВБР. На рис. 1 показана концепция нашей установки квази-распределенного оптоволоконного расходомера ближнего действия. Она реализуется путем вставки оптического волокна в трубопровод из политетрафторэтилена (ПТФЭ) длиной около одного метра.

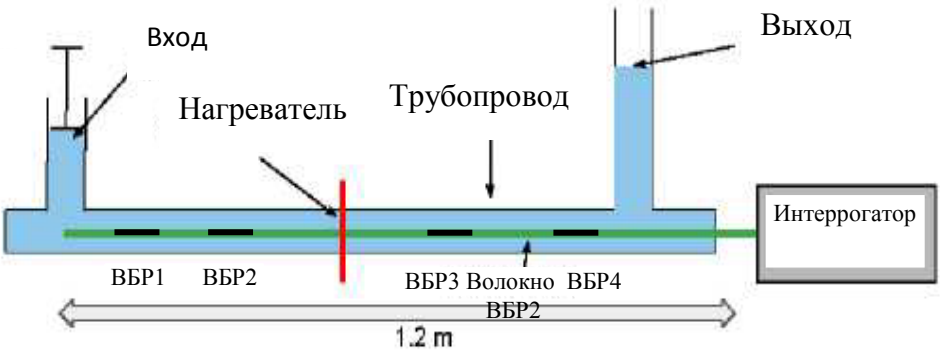


Рис. 1 - Структура одноволоконного квази-распределенного термоанемометра

Перед началом любой регистрации температуры трубка заполняется деионизированной водой и уравновешивается при температуре окружающей среды. Джоулев нагрев медной проволоки, обернутой вокруг трубки, локально нагревает провод. Температура внутри канала измеряется с помощью коммерчески доступной системы интеррогатора с ВБР1-ВБР4.

Концепция мониторинга массового расхода с использованием оптоволоконного температурного зондирования заключается в следующем. Джоулев нагрев в медной проволоке, обернутой вокруг трубопровода, локально повышает температуру жидкости. Массовый расход конвективно распространяет тепло вниз или вверх по потоку, а ВБР в оптоволокне, вставленном в жидкостный трубопровод, контролирует результирующее распределение температуры T(x) в точке их установки.

Для перехода в проектировании систем онлайн мониторинга температуры среды в трубопроводе с определением как скорости ее распространения, так и давления, надо рассмотреть применение АВБС и выбрать ее тип. Главное в том, что принцип опроса АВБС является радиофотонным – информация о спектре АВБС, полученная в оптическом диапазоне, может быть обработана в радиодиапазоне с использованием параметров огибающей биений адресных компонент брэгговской структуры. А это позволит избавиться от очень дорого оптико-электронного интеррогатора к радиофотонному, который состоит из наклонного фильтра и фотоприемника.

Однако, АВБС как правило имеют большую длину, что ограничивает их применение как точечных датчиков. В работе рассмотрены волоконно-оптические анемометры на АВБС, которые записаны по отдельным компонентам в многосердцевинном волокне.

Многосердцевинные волокна и АВБС в них. В последние годы все больше внимания уделяется сенсорным приложениям МСВ с ВБР. Разработаны различные методы записи брэгговских структур в МСВ, включая запись по всем сердцевинам и запись по каждой из сердцевин отдельно. В методах изготовления ВБР в МСВ каждая техника записи имеет свои преимущества. Однако при записи ВБР с разными периодами, что требуется для записи АВБС необходимо менять фазовые маски, что снижает скорость записи. Эффект затенения сердцевин не может быть полностью исключен, что приводит к отсутствию однородности в ВБР каждой сердцевины. Метод записи по отдельным сердцевинам позволяет контролировать процесс записи, что делает его более гибким и удобным. И он может смягчить эффект линзы и эффект тени, присущий самому волокну. Однако из-за ограничений физического размера волокна этот метод требует высокой точности в управлении двигателем, что увеличивает сложность процесса записи.

Устройство одноволоконного многосердцевинного квази-распределенного анемометра на АВБС. На рис. 2 представлен схематический принцип измерения, при котором в измеряемую трубу встроен МСВ на базе АВБС [7] и модуль нагрева. Для удобства работы АВБС записаны в боковых серцевинах, а нагреваемый элемент в центральной. На рис. 2,а показано семисердцевинное волокно с полной записью АВБС в шести серцевинах, на рис 2,б – с записью в трех сердцевинах.

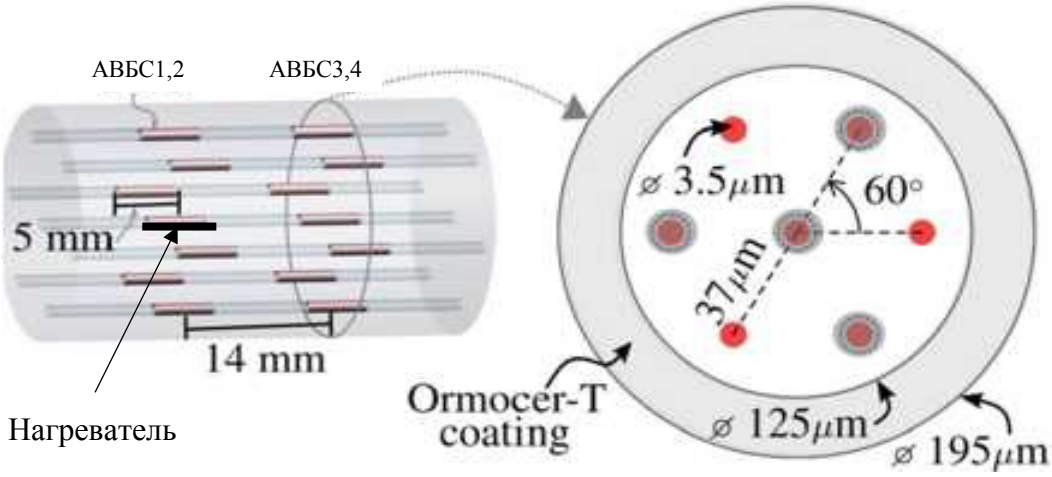


Рис. 2 - Структура одноволоконного многосердцевинного
квази-распределенного термоанемометра

Совмещенный датчик температуры АВБС1,2 представим как двухсенсорную измерительную систему, построенную на двух трехкомпонентных АВБС. Обозначим присутствующие в системе два АВБС датчика – $АВБС_1$ и $АВБС_2$, с несовпадающими адресными разностными частотами Ω_1, Ω_2 и Ω_3, с положением левой оптической составляющей на ω_1, а центральной и правой оптической составляющей на частотах $\omega_1 + \Omega_1$ и $\omega_1 + \Omega_1 + \Omega_2$, соответственно, так что $\Omega_1+\Omega_2=\Omega_3$. Для определенности примем $\Omega_1 \neq \Omega_2 \neq \Omega_3$, что можно допустить без потери общности рассуждений.

Функциональная оптико-электронная схема опроса совмещенного датчика на основе двух АВБС с нормировкой выходного сигнала перед фотоприемником представлена на рис. 3. Широкополосный источник *1* со встроенным частотным фильтром, пропускающий диапазон частот соответствующий диапазону измерений, генерирует непрерывное лазерное излучение (диаграмма *a*), которое проходя через оптоволоконный разветвитель *9*, поступает на две АВБС *2.1* и *2.2*. Каждая из двух АВБС формирует двухчастотное излучение, которое суммируется в одно общее излучение (диаграмма *b*) посредством оптоволоконного сумматора *10*.

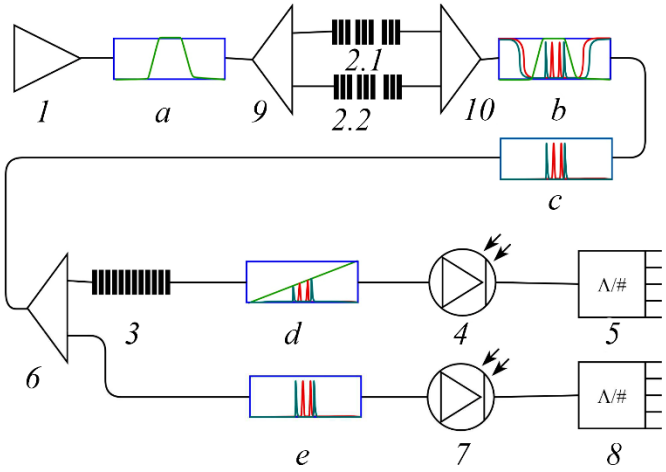


Рис. 3 - Функциональная оптико-электронная схема опроса совмещенного датчика на основе двух АВБС и нормировки выходного сигнала перед фотоприемником:
1 – широкополосный лазерный источник; *2.1 – 2.2* – АВБС; *3* – линейный наклонный фильтр; *4* – измерительный фотоприемник; *5* – измерительный АЦП; *6* – оптический разветвитель; *7* – опорный фотоприемник; *8* – опорный АЦП (*a – e* – спектральные диаграммы оптического сигнала на соответствующем участке схемы)

На выходе с оптоволоконного сумматора получаем четырехчастотное лазерное излучение (диаграмма *c*), которое проходит через оптоволоконный разветвитель *6*, делящий оптический сигнал на два канала – измерительный и опорный для контроля мощности.

В измерительном канале установлен фильтр *3* с наклонной линейной характеристикой, модифицирующий амплитуды четырехчастотного излучения в асимметричное излечение (диаграмма *d*). После этого сигнал поступает на измерительный фотоприемник *4* и принимается на измерительный АЦП *5*. Сигнал с АЦП *5* методом частотной (аналоговой или цифровой) фильтрации служит для определения положения АВБС. В опорном канале сигнал (диаграмма *e*) поступает на опорный фотоприемник контроля мощности входного оптического сигнала *7* и принимается на опорный АЦП *8*. Все дальнейшие вычисления идут с отношением мощностей в измерительном и опорном каналах.

При записи ВБР-компонент в четырех сердцевинах, для снятия информации применимы те же рассуждения, но касающиеся последовательности АВБС по длине волокна.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

Список литературы

1. *Jiang X. et al.* Optical sensor of thermal gas flow based on fiber Bragg grating // Sensors. 2017. Vol. 17. P. 374.
2. *Njegovec M. et al.* Optical micro-wire flow-velocity sensor // Sensors. 2021. Vol. 21. P. 4025.
3. *Мисбахов Рус.Ш. и др.* Комбинированные двухкомпонентные многоадресные волоконные брэгговские структуры // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2024. № 2 (62). С. 77-90.

2.3.3.

Ф.М. Виноградов, С.В. Литвинов, А.А. Верещагин

МИРЭА - Российский технологический университет,
Институт радиоэлектроники и информатики,
Litvinov_S@mirea.ru

ВЛИЯНИЕ СТЫКОВКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА ПОТЕРИ СИГНАЛА

Качество передачи данных в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) зависит от многих факторов. Потери в мощности передаваемого сигнала наблюдаются в разъемных соединениях (т.е. при использовании коннекторов). Также потери появляются в случае обрыва и последующего неидеального соединения методом сварки. В статье оцениваются потери мощности передачи сигнала в ВОЛС в случае неразрывного соединения, качественной сварки волокна и заведомо неидеальной сварки. Работа носит прикладной характер, и результаты могут быть полезны при проектировании ВОЛС.

Ключевые слова: d*олоконно-оптические линии связи, ВОЛС, сварка.*

1. **Введение.** Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) в настоящее время являются основой современных телекоммуникационных сетей благодаря их высокому ресурсу, пропускной способности и крайне низкому уровню потерь на больших дистанциях [1]. В типичном одномодовом оптическом волокне затухание сигнала составляет порядка 0,2–0,3 дБ/км на длине волны 1550 нм и около 0,35 дБ/км на 1310 нм [2]. Эти величины на несколько порядков ниже, чем потери в традиционных медных проводах, что обеспечивает возможность передачи информации на десятки и сотни километров без необходимости установки усилителей сигнала. Особенно актуально применение ВОЛС в магистральных сетях и дата-центрах, где требуется передача больших объёмов данных на большие расстояния с минимальными искажениями. Кроме того, оптическое волокно не подвержено электромагнитным помехам и обеспечивает высокую степень защищённости передаваемой информации.

2. При этом, даже при исключительно малых удельных потерях самого оптического волокна, суммарные потери в реальной линии определяются не только длиной трассы, но и качеством соединений между отрезками волокна. В любой линии присутствуют точки стыковки: разъёмные соединения (съемные коннекторы) и неразъёмные соединения (сварные спаи). На каждом таком стыке возникают дополнительные вносимые потери (insertion loss), а в случае несогласованности показателей преломления или геометрии торцов — обратные отражения сигнала (возвратные потери).

Длины волн и их особенности. Передача информации в ВОЛС осуществляется в определённых диапазонах спектра, где потери в волокне минимальны. Силикатные оптические волокна имеют несколько «окон прозрачности» – диапазонов длины волны, в которых удельное затухание минимально за счёт снижения комбинированного влияния. Стандартное ступенчатое оптическое волокно имеет три окна прозрачности: 850 нм, 1310 нм и 1550 нм [3].

Затухание оптического сигнала при распространении по волокну обусловлено несколькими физическими механизмами. Основную роль играет рассеяние Рэлея, вызванное микронеоднородностями показателя преломления в стекле. Это приводит к тому, что некоторая доля света рассеивается во внеосевом направлении и покидает волокно. Интенсивность рассеяния Рэлея значительно выше на более коротких волнах (растёт обратно пропорционально четвёртой степени длины волны), что объясняет относительно большие потери на 850 нм по сравнению с 1310/1550 нм. Также присутствует поглощение в материале

стекла: собственное поглощение чистого кварца невелико в указанных окнах прозрачности, однако неизбежно присутствующие примеси вносят вклад в хатухание сигнала

Аппаратное обеспечение. Для сварки предварительно разрезанного и затем сколотого оптического волокна применялся Fusion Splicer T-400S (рисунок 1, слева). Для проведения измерений использован измеритель оптической мощности EOT-100 (рис. 1, справа)

Рис. 1 – Аппаратное обеспечение исследования

Тестер EOT-100 позволяет работать на длинах 1310 нм и 1550 нм, измеряя относительные потери в дБ при чувствительности до –70 дБм. Выходной сигнал вводили в тестируемый участок через соответствующий патчкорд, калибровали прибор до 0 дБ перед каждым экспериментом и проводили измерения при комнатной температуре после прогрева источника и приёмника.

Методика эксперимента заключалась в измерении мощности передачи сигнала на двух длинах волн 1310 и 1550 нм для различных кабелей.

Результаты исследования. Серия испытаний заключается в измерении потерь на неразъёмных соединениях волокон (сварке) в зависимости от качества выполнения. Рассматривались три случая: «заводской» стык - условно идеальное соединение, имитируется непрерывным волокном без стыка, качественная сварка (рисунок 2, слева) - выполненная по всем правилам и некачественная сварка (рисунок 2, справа) - умышленно допущены нарушения при сплавлении. Полученные результаты суммарных потерь на стыке представлены в таблице 1.

Рис. 2 – Сварка хорошо «сколотых» окончаний (слева) и плохо «сколотых» окончаний (справа) волоконно оптического кабеля.

Таблица 1 – Потери при сварке волокон в разных условиях:

Условие сварки	**1310 нм, дБ**	**1550 нм, дБ**
Заводское изготовление (нет стыка)	-0.05	-0.13
Хорошая сварка	-0.15	-0.08
Плохая сварка	-1.15	-1.12

Так видно, что качественно выполненная сварка обеспечивает минимальные потери соединения – порядка 0,05–0,1 дБ, что близко к отсутствию стыка. Современные сварочные аппараты с активной юстировкой позволяют получать столь малое затухание практически всегда, при соблюдении технологии. В нашем опыте прибор оценил потери хорошей сварки как 0,01 дБ, а рефлектометр не обнаружил заметного отражения на стыке. Напротив, при некачественной сварке потери выросли примерно на порядок – до ~1,1 дБ. Это все еще не колоссальная величина, однако для магистральных ВОЛС она неприемлема (стандарты обычно требуют ≤0,2–0,3 дБ на сварку). Кроме того, было замечено, что дефектная сварка сопровождалась значительными обратными отражениями (ORL), что негативно сказывается на работе передающих лазеров.

Таким образом, строгий контроль параметров при сварке и чистоты волокон критически важен. Каждый сварной стык должен проверяться; если потери превышают нормативные (~0,2–0,5 дБ), соединение следует переварить заново.

Данный эксперимент демонстрирует, что сварка, выполненная по всем правилам, практически не вносит дополнительного затухания по сравнению с целым волокном, тогда как отступление от технологии приводит к возрастанию потерь на порядок и более.

Заключение. В ходе работы показано, что при правильной процедуре сварки оптического волокна обеспечивается потери ~0,05–0,1 дБ, при этом дефектная сварка даёт ≥1 дБ и сильные отражения, поэтому в магистральных сетях требуется тщательный контроль и переварка некачественных стыков. В целом для минимизации потерь важны качественное волокно, аккуратная прокладка, чистые коннекторы и профессиональная сварка.

Список литературы

1. *Гриценко А.А.* Волоконно-оптические линии связи и перспективы их развития // Актуальные вопросы современной науки и образования: сборник статей XIV Международной научно-практической конференции. В 2 частях, Пенза, 10 ноября 2021 года. Том 1. – Пенза: Наука и Просвещение, 2021. – С. 59-61. – EDN KMZVUW.
2. *Ефанов В.И., Вождаев Д.В.* О расчете затухания света в оптическом волокне // Фотон-экспресс. – 2009. – № 3(75). – С. 28-30. – EDN TIAAAR.
3. *Родина О.В.* Волоконно-оптические линии связи. Практическое руководство. - М.: Горячая линия – Телеком, 2016. - 400 с.
4. Свидетельство об утверждении типа средства измерений СА.С.37.003.А №28323 от 11 сентября 2012 г. // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Приказ №651 от 24.08.2012.
5. Принципы построения инфокоммуникационных систем : учебное пособие / Г. Н. Третьяков, Ю. П. Перова, В. О. Семина. — Москва : РТУ МИРЭА, 2023. — 100 с. — ISBN 978-5-7339-1828-0.
6. *Верещагин А.А.* Сетевое администрирование [Электронный ресурс]: Практикум / Верещагин А.А, Супруненко Д.В. — М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2019 . — 37 с.
7. Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей : Практикум / А. С. Кольцов, Л. В. Степанов, С. Ю. Кобзистый. – Иваново : ИПК «ПресСто», 2022. – 80 с. – EDN PGTYAU.
8. *Виноградов В.В., Котов В.К., Нуприк В.Н.* Волоконно-оптические линии связи. – М.: Радио и связь, 2001. – 312 с.
9. *Портнов Э.Л.* Оптические кабели связи, их монтаж и измерения: Уч. пособие для вузов. - М.: Горячая линия – Телеком, 2012.
10. *Виноградов Ф.М., Литвинов С.В., Самохина Е.В.* Влияние типа коннектора ВОЛС на качество связи // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем ("Радиоинфоком-2024") : Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции, Москва, 18–22 ноября 2024 года. – Москва: МИРЭА-Российский технологический университет, 2024. – С. 227-232. – EDN DRAJQD.

2.3.3.

М.С. Виноградов, Т.А. Дехтярь, И.О. Разинкин

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кафедра 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование», Москва

АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ АППАРАТУРЫ НА ФНЗС В РЛС С ЦИФРОВЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ СИГНАЛОВ

В данной работе предложен алгоритм, позволяющий повысить эффективность согласованной обработки сигналов в РЛС, построенных на основе цифровых блоков ФОРС. Проведено экспериментальное подтверждение эффективности алгоритма, и оценены улучшения ТТХ РЛС при его применении.

Ключевые слова: *цифровая обработка сигналов, ФОРС, согласованная фильтрация.*

Введение

Тенденцией последних поколений как наземных так и бортовых РЛС стало активное внедрение цифровой аппаратуры формирования и обработки сигналов [1].

Большинство современных РЛС включают в себя блок формирования и обработки радиосигналов (ФОРС) [2], который как правило выполнен на базе программируемое логической интегральной схемы (ПЛИС) или сигнального процессора (СП). Очевидно, что в таких РЛС формирование и обработка радиосигналов происходит при помощи цифровой аппаратуры.

Использование подобных цифровых блоков в РЛС может приводить к искажению параметров зондирующего сигнала, а значит требуется процедура оценки и оптимизации цифровой обработки для сохранения тактико-технических характеристик РЛС.

Влияние искажения ЗС на согласованную обработку

Цифровая аппаратура в РЛС предполагает наличие аналогово-цифровых и цифро-аналоговых преобразований, которые вносят искажения в зондирующий сигнал. Основными факторами, влияющими на сигнал при цифро-аналоговом и аналого-цифровом преобразовании можно считать мультипликативный шум, вызванный непостоянством положения фронта тактового импульса во времени (джиттер), аддитивный шум вызванный квантованием, а так же нелинейности комплексной частотной характеристики антиалиасингового фильтра (ААФ). Искажение гармонического сигнала в таком случае можно описать следующим образом:

$$\mathrm{s[n]} = A|H(f)|e^{j(2\pi f n T_s + \varphi + \arg(Hj2\pi f))} \cdot (1 + j2\pi f \delta t_n) + e[n] \quad (1)$$

где, A – амплитуда сигнала, $H(f)$ – Передаточная функция ААФ, f – частота сигнала, T_s - номинальный период дискретизации, φ – начальная фаза сигнала, δt_n - случайная ошибка джиттера для n-й выборки, является случайной комплексной вылеченной с нулевым мат. ожиданием, $e[n]$ - комплексный шум квантования.

Кроме того, искажения зондирующего сигнала (ЗС) в приемо-передающих трактах связано так же с амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) используемых в них нелинейных устройств. Известно, что в большинстве современных РЛС использованы подходы согласованной фильтрации [1], которые призваны осуществить оптимальную обработку инвариантную к времени запаздывания, отраженного от цели ЗС. При оптимальной работе такого обнаружителя, выход СФ является дискретной свёрткой входного сигнала s[n], импульсной характеристикой (ИХ) h[n] СФ, которая определяется как зеркально отражённый и сопряжённый исходный сигнал $s^*[N-1-(n-k)]$:

$$y[\mathrm{n}] = \sum_{k=0}^{N-1} s[k] \cdot s^*[N-1-(n-k)] \quad (2)$$

Где N - длина вектора отсчетов сигнала

Соответственно, при искажениях параметров ЗС в ходе прохождения преобразований в трактах РЛС, как показано в выражении (1), согласованный с ним фильтр при обработке, осуществляемой так, как показано в (2), становиться квазисогласованным, и эффективность обработки снижается. Оценкой сигнала на выходе и его ханрактеристик может случить функция неопределенности зондирующего сигнала (ФНЗС) и её сечения [3], например, одно из них, соответствующее выходному отклику СФ при различном проценте искажения сигнала показано на рисунке 1.

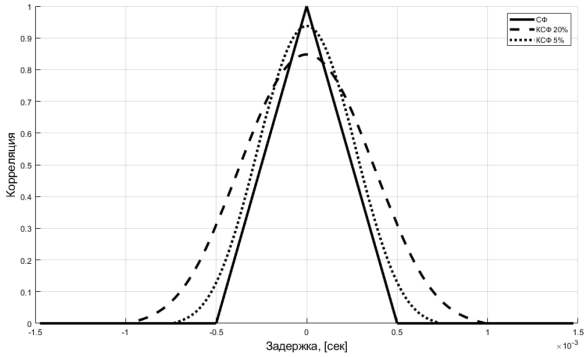


Рис. 1 - Увеличение ширины сигнала на выходе СФ при рассогласовании

Таким образом, становиться актуальным вопрос модернизации систем обработки в РЛС, а именно создание адаптивных СФ и алгоритмов адаптации для них.

Алгоритм оптимизации цифровой обработки с целью повышения ТТХ РЛС

Авторами предлагается алгоритм оптимизации цифровой обработки в РЛС с цифровым блоком ФОРС, который позволит производить адаптивную обработку с учетом искажений ЗС в приемо-перадающих траках, что позволит нивелировать их влияния на эффективность согласованной фильтрации сигналов.

Для описания алгоритма, на рисунке 2 приведена упрощённая схема импульсной РЛС с цифровым блоком ФОРС.

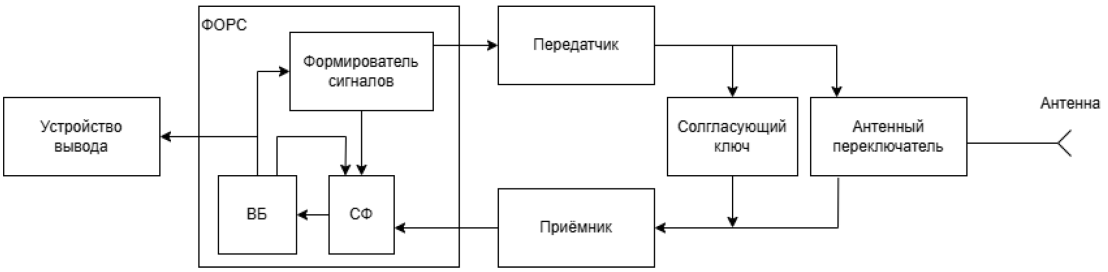


Рис. 2 - Схема РЛС с цифровым блоком ФОРС

Отметим что в схему так же включён блок «Согласующий ключ», который позволяет добиться «короткого замыкания» сигнала с передатчика на приёмник, минуя излучения в эфир. Это и является основой предлагаемого алгоритма.

При замыкании согласующего ключа, ВБ отдаёт команду формирователю сигналов на генерацию широкополосного пилот-сигнала, который в самом простом случае может быть представлен в виде короткого импульса вида Sinc. Пилот-сигнал проходит через блок передатчика, через замкнутый ключ попадает в блок приёмника и далее возвращается в блок ФОРС для обработки. Спектральная плотность прошедшего передающий и приёмный тракты пилот-сигнала при условии что его ширина спектра больше полосы пропускания блоков РЛС ($\Delta f_{\text{пилот-сигнал}} > \Delta f_{\text{РЛС}}$) будет представлять из себя АЧХ системы:

$$S_{\text{пилто}-\text{сигнал}}(f) = H_{\text{передатчика}}(f) \cdot H_{\text{приёмника}}(f) \cdot H_{\text{линий передачи}}(f) = H(f) \quad (3)$$

Таким образом в ФОРС возвращается частотная характеристика системы. ВБ формирует согласующий фильтр для зондирующего сигнала с учётом АЧХ системы:

$$H_{СФ} = H(f) \cdot S_{ЗС}(f) \quad (4)$$

Следовательно, рассогласование характеристики СФ с ЗС уменьшается, а разрешающая способность РЛС возрастает. Так же данный подход позволяет проводить адаптацию

системы при смене параметров ЗС.

Для подтверждения работоспособности алгоритма был проведён эксперимент с использованием макета ультразвукового локатора с цифровым формированием сигналов. В качестве пилот-сигнала для получения ИХ и АЧХ приёмо-передающих трактов использовались короткие прямоугольные видеоимпульсы длительностью 0.1 мс. Результат представлен на рисунке 3. В ходе экспериментов для проверки алгоритма использовался зондирующий сигнал в виде последовательность прямоугольных радиоимпульсов с частотой заполнения 42 кГц и длительностью 1мс. Согласно вышеприведённому алгоритму удалось получить следующий результат, показанный на рисунке 4.

Рис. 3 - АЧХ системы

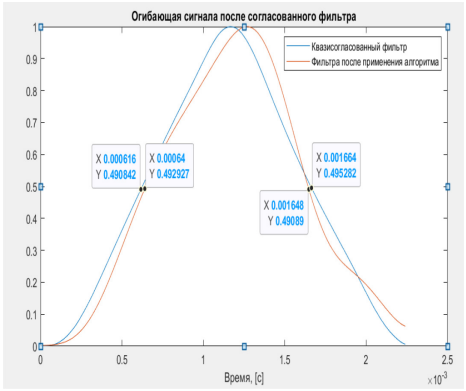


Рис. 4 - Сравнение ширины огибающей сигнала

Итак, ширина огибающей без адаптивной подстройки фильтра составила 1048 мкс, а после применения алгоритма подстройки 1008 мкс. Применение алгоритма подстройки характеристики согласующего фильтра с учётом искажений зондирующего сигнала в устройствах РЛС позволило на 3,82% сузить ширину сигнала на выходе СФ. Таким образом, применение предложенного алгоритма способно повысить разрешающую способность РЛС на 4%.

Заключение

По результатам проведенной работы определен состав системы измерения дальности и организация работы РТК в условиях однозначной априорной неопределённости местоположения объектов обработки. Предложен метод определения координат на основе многопозиционного метода определения. В результате усреднённой оценки модельных и полунатурных экспериментов определена погрешность определения координат в 1.5%, что показывает эффективность предложенной системы.

По результатам проведённой работы разработан алгоритм адаптивной подстройки СФ для РЛС с цифровым ФОРС. Описан принцип реализации алгоритма, а так же проведено экспериментальное исследование, подтверждение его работоспособность. Использование алгоритма позволяет на 4% увеличить разрешающую способность РЛС по дальности за счёт оптимизации обработки радиолокационной информации.

Список литературы

1. Патент № 2522982 C2 Российская Федерация, МПК G01S 13/00. радиолокационная станция кругового обзора : № 2012139675/07 : заявл. 18.09.2012 : опубл. 20.07.2014 / С. В. Бурка, А. В. Ефимов, А. И. Дьяков [и др.] ; заявитель Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – EDN LDVVGQ.

2. Блок формирования и обработки радиолокационных сигналов (ФОРС) // ПАО "ЦНПО "ЛЕНИНЕЦ" URL: https://npo-leninetz.ru/strategicheskie-naprvaleniya/napravleniya-1/fors/ (дата обращения: 07.06.2025).

3. *Татарский Б.Г.* Исследование особенностей функции неопределенности сигнала с нелинейной частотной модуляцией / Б. Г. Татарский, Д. А. Ясенцев // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2007. – Т. 5, № 11. – С. 8-13. – EDN ICEQMR.

2.3.3.

А.Д. Громов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Инженерная школа ядерных технологий,
Томск, adg17@tpu.ru

ТРАНСЛЯЦИЯ EDDL ОПИСАНИЙ

В работе представлены результаты разработки транслятора электронных описаний устройств на языке EDDL в формате .fm8. Транслятор выполняет интерпретацию конструкций EDDL в информационную модель и генерирует эквивалентный код для этой модели на языке программирования C++. Представлены основные результаты испытаний транслятора EDDL.

Ключевые слова: *транслятор, электронное описание устройства, трансляция кода, (система мониторинга и диагностики).*

Актуальность разработки обусловлена приостановкой сопровождения протокола HART на территории Российской Федерации. На базе АНО Института нефтегазовых технологических инициатив разрабатывается стандарт полевой шины передачи данных Колибри, согласно которому в ООО «АСПЕКТ» разрабатывается программное обеспечение системы мониторинга и диагностики КИПиА совместимой с протоколом HART на физическом и канальном уровнях. Работа в СМиД Колибри осуществляется посредством уникальных электронных описаний устройств, написанных на языке программирования C++, Colibri Device Description (CDD) [1].

Полевая шина передачи данных Колибри представляет собой сервис связи между полевыми устройствами, выступающими в качестве подчинённых устройств, и главными устройствами (хост система, коммуникатор, ПЛК, мультиплексор и т.д.). На физическом и канальном уровне полевая шина Колибри полностью совместима с шиной и протоколом HART. Различие заключается в реализации прикладного уровня без применения импортного программного обеспечения (токенайзеров и интерпретаторов от FieldComm Group). Работа инженера/оператора с полевыми устройствами осуществляется посредством пользовательского интерфейса через CDD.

Разработанный транслятор представляет собой утилиту, реализованную на языке Python, предназначенную для обработки бинарных файлов формата «.fm8», содержащих сериализованные структуры, соответствующие EDDL-описанию полевых устройств [2-4].

Генерация C++ исходников осуществляется преимущественно через вызовы file.write(), однако на отдельных этапах используется построчная обработка с применением регулярных выражений для внесения контекстно-зависимых изменений. Проектная структура создаётся автоматически, включая директории и шаблонные файлы с объявлениями и реализациями классов устройств.

Алгоритм работы транслятора [5] (рис.1) можно представить в следующей последовательности:

а) инициализация и открытие бинарного файла «.fm8» в режиме побайтового чтения;

б) последовательный разбор потока данных с применением процедурного декодера – каждый считанный байт анализируется в контексте текущего состояния автомата разбора;

в) определение типа конструкции по сигнатурному байту, чтение длины блока, извлечение вложенных атрибутов, десериализация строковых и числовых данных;

г) формирование внутренних представлений конструкций EDDL в виде объектной модели;

д) генерация исходных файлов C++ (.cpp, .h) с использованием встроенного шаблона печати, ориентированного на SDK программного обеспечения сервера полевой шины Колибри.

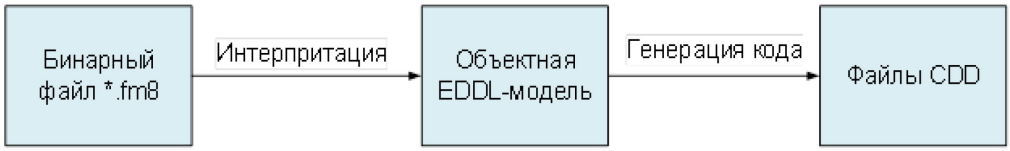


Рис. 1 – Схема алгоритма трансляции

В качестве критериев работоспособности электронного описания были приняты следующие признаки:

– корректное отображение всех меню;
– все переменные, находящиеся в меню, корректно считываются и записываются;
– корректная работа всех кнопок.

В соответствие с вышеописанными критериями были успешно проведены тесты 34 транслированных описаний устройств. Исходя из содержания 10 описаний (табл. 1), видно, что описание EDDL может содержать от 100 до более 2500 элементов.

Таблица 1 – Результаты трансляции EDDL-описаний по количественным показателям

Номер	Результаты трансляции	Номер	Результаты трансляции
1	Количество элеменов в DD: 166 Переменных: 73 Коллекций: 2 Массивов: 2 Команд: 36 Методов: 13 Меню: 31 Нераспознано элементов: 9 (5%)	2	Количество элеменов в DD: 1431 Переменных: 1204 Коллекций: 14 Массивов: 9 Команд: 36 Методов: 19 Меню: 101 Нераспознано элементов: 48 (3%)
3	Количество элеменов в DD: 213 Переменных: 118 Коллекций: 6 Массивов: 3 Команд: 39 Методов: 13 Меню: 25 Нераспознано элементов: 9 (4%)	4	Количество элеменов в DD: 746 Переменных: 420 Коллекций: 24 Массивов: 3 Команд: 32 Методов: 73 Меню: 169 Нераспознано элементов: 25 (3%)
5	Количество элеменов в DD: 463 Переменных: 336 Коллекций: 19 Массивов: 4 Команд: 44 Методов: 17 Меню: 24 Нераспознано элементов: 19 (4%)	6	Количество элеменов в DD: 803 Переменных: 482 Коллекций: 16 Массивов: 7 Команд: 139 Методов: 52 Меню: 88 Нераспознано элементов: 18 (2%)
7	Количество элеменов в DD: 465 Переменных: 335 Коллекций: 9 Массивов: 4 Команд: 54 Методов: 20 Меню: 33 Нераспознано элементов: 10 (2%)	8	Количество элеменов в DD: 274 Переменных: 204 Коллекций: 13 Массивов: 2 Команд: 25 Методов: 2 Меню: 21 Нераспознано элементов: 7 (2%)
9	Количество элеменов в DD: 1412 Переменных: 1178 Коллекций: 10 Массивов: 11 Команд: 53 Методов: 31 Меню: 65 Нераспознано элементов: 64 (4%)	10	Количество элеменов в DD: 2567 Переменных: 2250 Коллекций: 10 Массивов: 11 Команд: 55 Методов: 61 Меню: 99 Нераспознано элементов: 81 (3%)

На данный момент реализована трансляция для следующих базовых EDDL элементов: VARIABLE – переменная; COLLECTION[OF item_type] – коллекция; REFERENCE_ARRAY, VALUE_ARRAY – массив; COMMAND – команда; METHOD – метод; MENU – меню. К нераспознанным элементам относятся такие элементы EDDL как: IMAGE, GRAPH, GRID, WAVEFORM, которые в сумме составляют менее 5% от электронного описания.

Готовая CDD открывается в СМиД Колибри (рис. 2). Слева находится дерево меню, необходимое для навигации по описанию. В окне справа отображаются элементы меню: переменные и методы (кнопки).

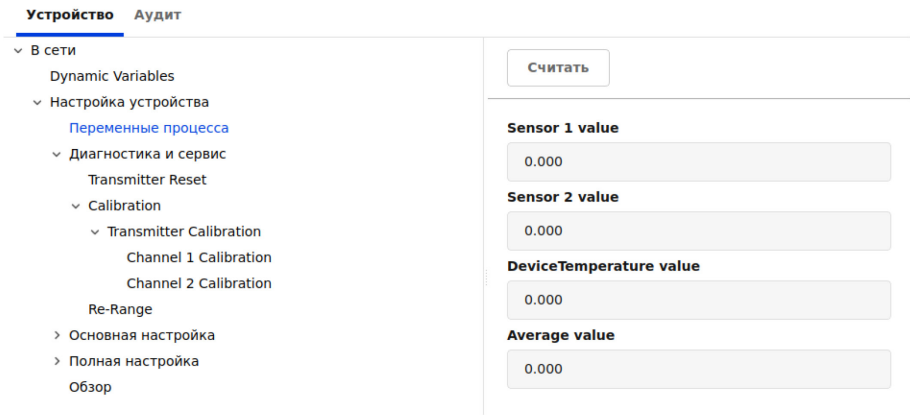


Рис. 2 – Интерфейс CDD в СМиД Колибри

Новизна предложенного решения заключается в том, что в первые предложена методика трансляции EDDL в C++, позволяющая оперативно интегрировать КИПиА с бинарными электронными описаниями EDDL в любые системы, в том числе и в отечественные СМиД КИПиА, в виде подгружаемых библиотек на языке C++.

Разработанный транслятор EDDL-описаний успешно обработал 34 реальных описаний различной сложности. Основные функциональные элементы, включая переменные, команды и меню, успешно интерпретируются и формируют корректную выходную структуру. В текущей версии частично не реализована поддержка элементов, отвечающих за визуальное оформление интерфейса. Эти компоненты находятся в планах дальнейшей разработки, что позволит обеспечить визуальную совместимость.

Работа выполнена в рамках ОТЗ-06.01.15.2024. «Полевая шина передачи данных Колибри. Типовые технические требования.».

Список литературы

1. *Pushkarskiy R.V., Belsky V.A.* Development of a dynamic user interface for an electronic device descriptions interpreter for intelligent sensors // Молодежь и современные информационные технологии. Сборник трудов XXI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск. – 2024. – С. 701-704.
2. *Kolodii S.V., Kurkin D.V., Monakhov M.A., Gaifulin R.M.* A method for integrating field devices into open and isolated control systems based on the dynamic mapping of EDD description on OPC UA. // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. 2025. Vol. 25, no. 1. P. 5–17.
3. FCG TS61804-3. Specification. EDDL Syntax and Semantics // FieldComm Group, PROFIBUS Nutzerorganisation e. V. (PNO). – URL: https://library.fieldcommgroup.org/61804/TS61804-3/4.2/#page=1 (accessed: 02.07.2025)
4. FCG TS61804-4. Specification. EDDL Interpretation // FieldComm Group, PROFIBUS Nutzerorganisation e. V. (PNO). – URL: https://library.fieldcommgroup.org/61804/TS61804-4/2.2/#page=1 (accessed: 02.07.2025)
5. *Ахо, Альфред В., Лам, Моника С., Сети, Рави, Кльман, Джеффри Д.* Компиляторы: принципы, технологии и инструментарий, 2-е изд. : Пер. С англ. – М. : ООО “И.Д. Вильямс”, 2008. – 1184 с. : ил. – Парал. тит. англ.

2.3.3.

Д.В. Гусев, О.А. Билоус

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет,
кафедра микропроцессорных средств автоматизации,
Пермь, septim10042003@gmail.com, bilous_oa@pstu.ru

СИНТЕЗ КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПАРА В СУШИЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ

Произведён расчёт и моделирование каскадного контура регулирования давления пара, подаваемого в сушильный цилиндр бумагоделательной машины, а также регулирования перепада давления на входе и выходе контура. В результате осуществляется корректировка подачи пара до достижения требуемого уровня давления и перепада

Ключевые слова: *передаточная функция, звено чистого запаздывания, ПИД-регулятор.*

Структурная схема каскадной системы автоматического регулирования давления пара, подаваемого в сушильный цилиндр, а также регулирования перепада давления на его входе и выходе показана на рисунке 1.

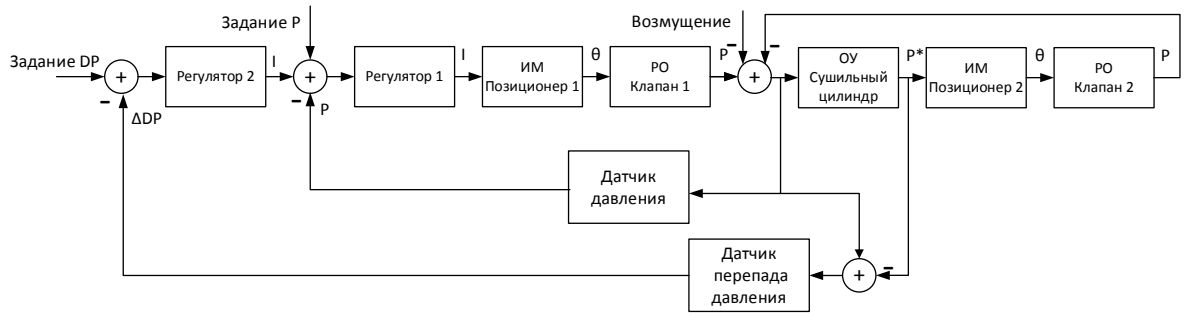


Рис. 1 – Структурная схема системы автоматического управления

Найдем передаточные функции системы регулирования давления пара.

1. Исполнительный механизм – позиционер

$$\frac{K_{\text{им}}}{T_{\text{им}}p+1} = \frac{5{,}625}{0{,}3p+1} \tag{1}$$

$$K_{\text{им}} = \frac{\Delta_{\text{движение хода}}}{\Delta_{\text{сигнала}}} = \frac{90^{\circ}-0^{\circ}}{20\text{мА}-4\text{мА}} = \frac{90^{\circ}}{16\text{мА}} = 5{,}625\ \text{град/мА} \tag{2}$$

где $T_{\text{им}} = 0{,}3$ сек (стандартная величина выбирамая из диапозона $0{,}1 - 0{,}5$ сек).

2. Регулирующий орган – регулирующий клапан

$$\frac{K_{\text{ро}}}{T_{\text{ро}}p+1} = \frac{8{,}4375}{0{,}35p+1} \tag{3}$$

$$K_{\text{ро}} = K_{\text{им}} \cdot K_{\text{мех.часть}} = 5{,}625 \cdot 1{,}5 = 8{,}4375 \tag{4}$$

где $T_{\text{ро}} = 0{,}35$ сек (стандартная величина выбирамая из диапозона $0{,}1 - 0{,}5$ сек);
$K_{\text{мех.часть}}$ – коэффициент мех. части клапана.

3. Обратная связь – датчик давления

$$\frac{K_{\text{дд}}}{T_{\text{дд}}p+1} = \frac{2{,}2857}{0{,}04p+1} \tag{5}$$

$$K_{\text{дд}} = \frac{\Delta_{\text{сигнала}}}{\Delta_{\text{пределы измерений}}} = \frac{20\text{мА}-4\text{мА}}{6\text{ бар}-(-1)\text{ бар}} = 2{,}2857\ \text{мА/бар} \tag{6}$$

где $T_{\text{дд}} = 0{,}04$ сек (стандартная величина, выбираемая из диапазона 0,01-0,1 сек).

4. Обратная связь – датчик перепада давления

$$\frac{K_{\text{дпд}}}{T_{\text{дпд}}p+1} = \frac{16}{0{,}06p+1} \tag{7}$$

$$K_{\text{дпд}} = \frac{\Delta_{\text{сигнала}}}{\Delta_{\text{пределы измерений}}} = \frac{20\text{мА} - 4\text{мА}}{1\text{ бар} - 0\text{ бар}} = 16\text{ мА/бар} \quad (8)$$

где $T_{\text{дпд}} = 0{,}06$ сек (стандартная величина, выбираемая из диапазона 0,01-0,1 сек).[1]

5. Объект управления – сушильный цилиндр

$$\frac{K_{\text{оу}}}{T_{\text{оу}}p+1} e^{-\tau p} = \frac{0{,}95}{0{,}0857\,p+1} e^{-3p} \quad (9)$$

Звено чистого запаздывания, отражающее задержку между подачей пара и фактической реакцией температуры/влажности в бумаге или корпусе цилиндра.

Реальная задержка связана не с движением пара, а с: инерцией нагрева металла, теплообменом через стенку цилиндра, накоплением и удалением конденсата.

В сушильных цилиндрах бумагоделательной машины существует небольшая, но заметная задержка между тем, как в систему подаётся пар, и тем, как это отражается на температуре цилиндра и процессе сушки бумаги. Это происходит не потому, что пар медленно движется, а потому что:

- Металл цилиндра должен сначала прогреться. У него большая масса, и на это нужно время.
- Тепло проходит через стенку цилиндра к бумаге – это тоже занимает время.

Все эти процессы физически не могут произойти мгновенно. На практике – на реальных бумагоделательных машинах – измеряли, как быстро реагирует температура, и выяснили, что обычно задержка составляет: 2–4 секунды. Возьмем среднее значение задержки.

$$\tau = 3\text{ с} \quad (10)$$

Сушильный цилиндр – это массивное тело с большой инерцией. Его реакция похожа на гармонический осциллятор с медленным откликом. Это естественный период всей системы при возмущении, поскольку любое изменение давления будет влиять на тепловую инерцию по мере вращения.

$$T_{\text{оу}} = \frac{1}{11{,}67\text{ Гц}} = 0{,}0857\text{ сек} \quad (11)$$

где скорость вращения сушильных цилиндров 700/мин = 11,67 Гц

Это просто масштабный коэффициент усиления, показывающий, насколько сильно выход реагирует на вход. В нашем случае входное воздействие давление пара, выходная реакция: температура цилиндра.

$$K_{\text{оу}} = \frac{\Delta T_{\text{пара}}}{\Delta P_{\text{цил}}} k = \frac{5}{0{,}11} 0{,}008867 = 0{,}95 \quad (12)$$

где $\Delta T_{\text{пара}} = 15^{\circ}\text{C}$ – изменение температуры поверхности сушильного цилиндра;

$\Delta P_{\text{пара}} \approx 0{,}14$ бар –изменение давления пара, подаваемого внутрь сушильного цилиндра через вращающуюся головку;

$k = 0{,}008867$ – коррекция реальной чувствительности системы.[2]

Моделирование каскадной системы произведено в программе MATLAB. Структурная схема регулирование давления пара и перепада без регуляторов представлена на рисунке 2.

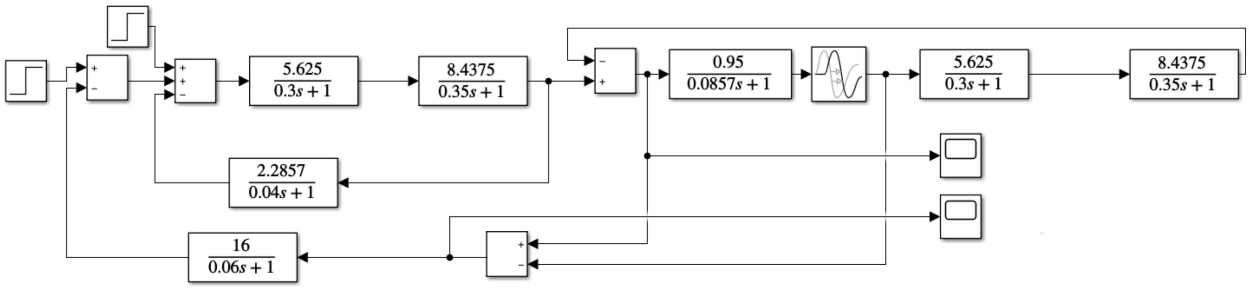


Рис. 2 – Структурная схема регулирование давления пара и перепада без регуляторов без регуляторов

Поскольку при моделировании системы без регуляторов полученная модель оказалась на границе устойчивости и фактически не является устойчивой, требуется введение регуляторов.

Сначала рассмотрим синтез регулятора внутреннего контура регулирования давления пара, подаваемого в сушильный цилиндр. Рассчитаем параметры регулятора настройкой на технический оптимум.

Так как для звена обратной связи Т меньше, чем для двух других звеньев, то апериодическое звено обратной связи можно представить, как усилительное звено с K=2,2857.

Передаточная функция регулятора, настроенного на технический оптимум[3]:

$$W_{\text{рег}} = \frac{W_{\text{ж}}(p)}{W_{\text{исх}}(p)W_{\text{ос}}(p)} \quad (13)$$

$$W_{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)} \quad (14)$$

Рассчитанные значения коэффициентов ПИ-регулятора:

$$K_{\text{п}} = 0{,}00498, K_{\text{и}} = 0{,}01423$$

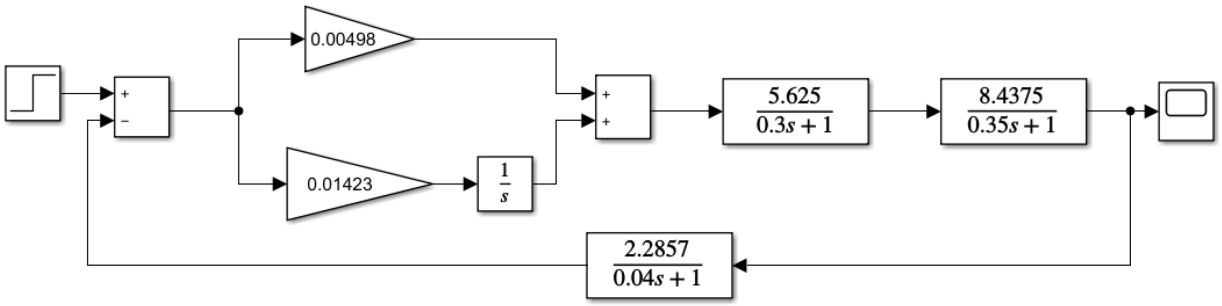


Рис. 3 – Структурная схема регулирование давления пара

Входным сигналом моделирования является давление пара 0,25 кбар

Показатели качества внутреннего контура регулирования: время переходного процесса $t_{\text{пп}} = 2{,}47$ сек, коэффициент перерегулирования $\sigma = 4$ %, установившаяся ошибка $e = 0$ %. Показатели качества удовлетворяют требуемым значениям.[4]

Далее рассмотрим синтез регулятора внешнего контура регулирования перепада давления пара, подвываемого на входе и на выходе в сушильный цилиндр. Так как внешний контур регулирования представлен сложной системой, используем встроенный блок PID Controller в MATLAB.

Использовав данный блок получился ПИД-регулятор с коэффициентами:

$$K_{\text{п}} = 0{,}000196, K_{\text{и}} = 0{,}0003284, K_{\text{д}} = 0{,}00012$$

Входным сигналом моделирования является перепад давление пара 0,11 кбар

Показатели качества внешнего контура регулирования: время переходного процесса $t_{\text{пп}} = 10{,}08$ сек, коэффициент перерегулирования $\sigma = 5{,}1$ %, установившаяся ошибка $e = 0$ %. Показатели качества удовлетворяют требуемым значениям.

Список литературы

1. Автоматизация технологических процессов и производств: учебное пособие для вузов / А. С. Климов, Н. Е. Машнин. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2021. – 236 с.

2. Автоматизация технологических процессов и производств/ В.Н. Суриков, Г.П. Буйлов; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна. – Санкт-Петербург: СПбГУПТД, 2017 – 118 с.

3. Теория управления техническими системами / В.А. Лукас 4-е изд., испр –- Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 2005. – 677 с.

4. Совершенствование процесса сушки бумаги на бумагоделательной машине с Использованием имитационного моделирования/ И.А. Гринченко; Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров. – Санкт-Петербург: СПбГТУРП, 2009 – 17 с.

2.3.3.

[1]Т.М. Закирьянов, [1]А.З. Петрова, [1]О.В. Никишина, [1]Д. Даххам,
[1]Г.А. Морозов, [2]С.В. Смирнов, [1]Ю.Е. Седельников

[1]Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ,
кафедра радиофотоники и микроволновых технологий,
[2]Казанский юридический институт МВД РФ,
кафедра экономики, финансового права и информационных технологий
в деятельности ОВД;
Казань, OGMorozov@kai.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ранее нами был разработан резонансный датчик измерения влажности куриного помёта и конского навоза в среде электродинамического моделирования CST Studio Suite. Была проведена оптимизация его размеров для того, чтобы добиться наилучшего графика коэффициента передачи. Для измерения температуры материала в разрабатываемый датчик внедрено оптическое волокно. При моделировании оптического волокна были использованы параметры для кварца, а именно: относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon' = 2.0851$, тангенс угла диэлектрических потерь $tg\,\delta = 7.9 \times 10^{-5}$. Конструкция такого датчика позволяет расположить жилу оптического волокна несколькими способами, что существенно скажется на результатах моделирования. Данный фактор был ключевым для обеспечения правильных законов компенсации температуры.

Ключевые слова: *микроволновый резонансный датчик влажности; распределение ЭМП; равномерность; влажность; компенсация; автоматизация контроля.*

Введение. Перед началом проведения моделирования измерения влажности материала построенным резонатором, требуется выяснить, какая из конструкций оптимальна для измерения влажности и температуры [1, 2]. Следовательно, нужно понять, в каком положении оптическое волокно способно лучше реагировать на температуру исследуемого материала. Для этого нами, в программной среде Solidworks Simulation, была построена симуляция распределения тепловых потоков в датчике, соприкасающимся с исследуемым материалом.

Распределение тепловых потоков. Общий ситуационный вид для проведения симуляции показан на рис. 1.

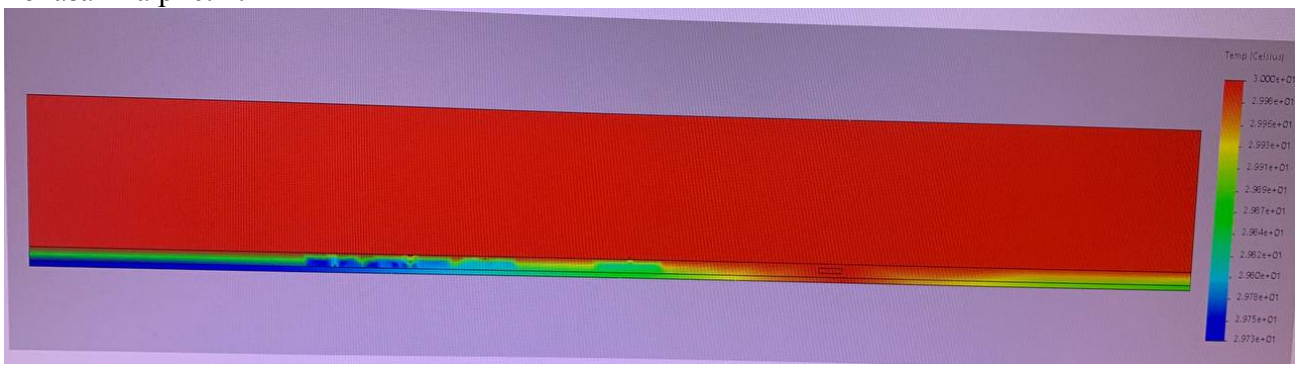


Рис. 1 - Симуляция распространения температуры от исследуемого материала к датчику

На графике справа показано изменение цвета, соответствующее изменению температуры. Максимальной температуре соответствует красный цвет, минимальной – синий. Сверху находится исследуемый материал, он показан красным цветом, так как он является

источником тепла. Ниже показан микроволновый датчик, который нагревается от исследуемого материала неравномерно.

На рис. 2 показано распределение температуры в каждом элементе конструкции. Изначально датчик имеет температуру окружающей среды, предположительно 23 градуса Цельсия, и охлаждается этой средой со стороны боковых граней в ходе всего моделирования.

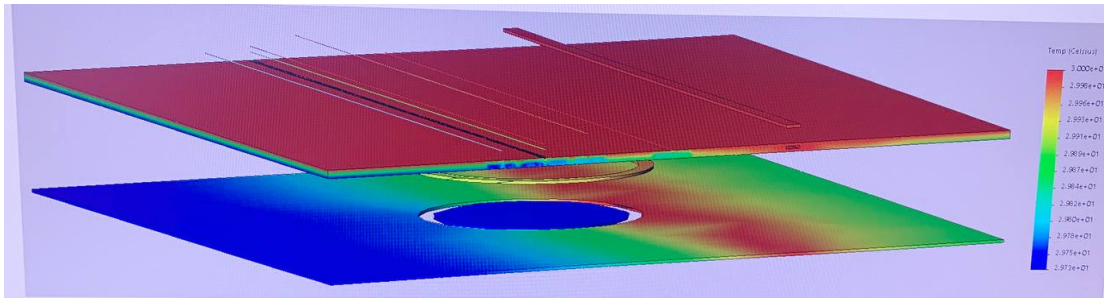


Рис. 2 - Распространение температуры в конструкции

На рис. 2 видно, что лучше всего тепло проходит через диэлектрик к медной подложке в местах, где находится полоской элемент и кольцо резонатора. Для того, чтобы определить, как расположить оптическое волокно так, чтобы его температура была ближе к температуре исследуемого материала, рассмотрим распределение температуры непосредственно в диэлектрике (рис. 3). На этом рисунке видно, что верхние слои диэлектрика нагреты значительно сильнее. Максимальная разность температур наблюдается в нижнем слое диэлектрика, над которым нет полосковой линии или кольца резонатора.

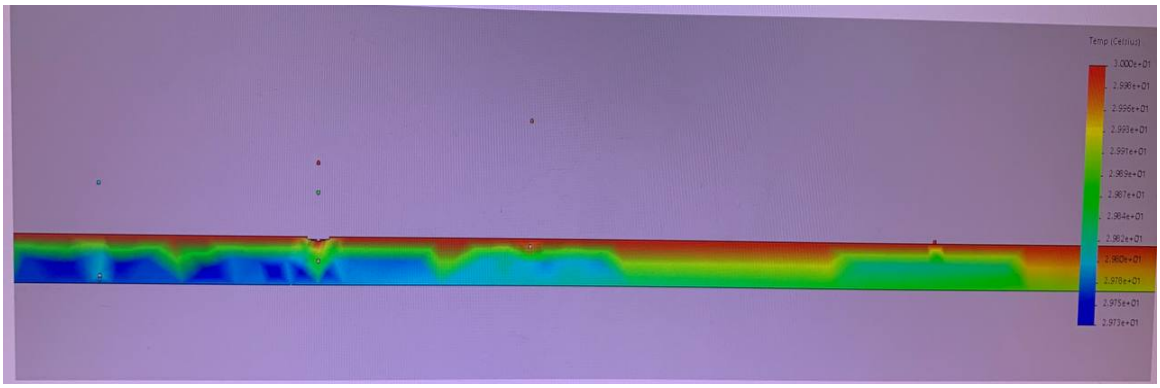


Рис. 3 - Распространение температуры в диэлектрике

Отличие температур оптических волокон показано на рис. 4.

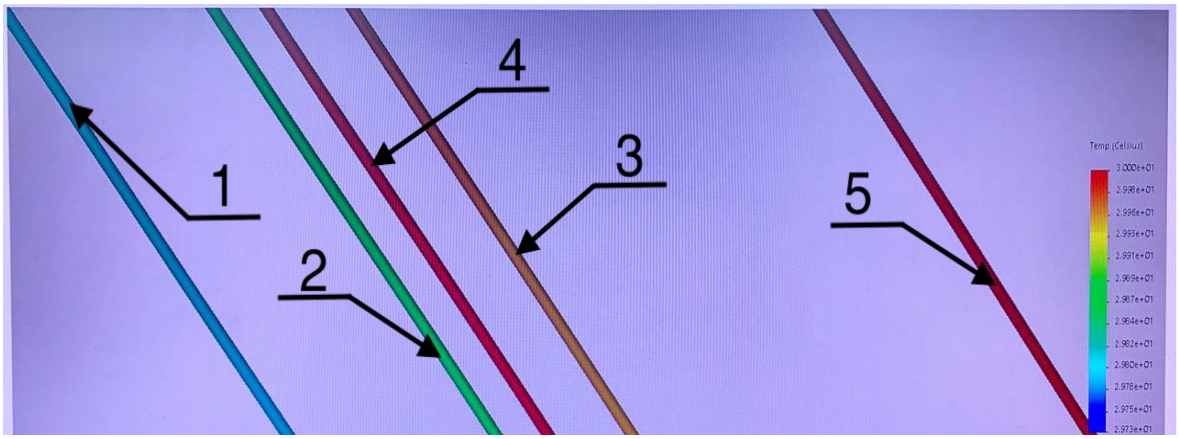


Рис. 4. Температура оптических волокон при различных конструкциях микроволнового датчика: 1–в нижнем слое диэлектрика; 2– в плоскости полосковой линии; 3– в верхнем слое диэлектрика; 4 – в углублении в верхней плоскости диэлектрика; 5 – на поверхности диэлектрика

Волокна пронумерованы в соответствии с вариантом их расположения. На рис. 4 видно, что оптическое волокно, находящееся на поверхности диэлектрика и в углублении, но касающееся диэлектрика, нагрелись до температуры диэлектрика. Оптические волокна, находящиеся в диэлектрике, нагрелись соответственно их удалению от материала, волокно расположенное под полосковой линией нагрелось значительно меньше остальных.

Из рис. 4 можно сделать вывод, что нам подходят три варианта расположения оптического волокна: на поверхности диэлектрика, в углублении на поверхности диэлектрика и в верхней плоскости диэлектрика. При расположении оптического волокна над поверхностью диэлектрика велик риск его механического повреждения, так как исследуемый материал будет двигаться по конвейерной линии, поэтому этот способ не подходит.

Волокно, находящееся в углублении на поверхности диэлектрика нагрелось незначительно лучше волокна, расположенного в верхнем слое диэлектрика, поэтому для принятия окончательного решения сравним графики коэффициентов передачи датчика на рис. 5 и рис. 6.

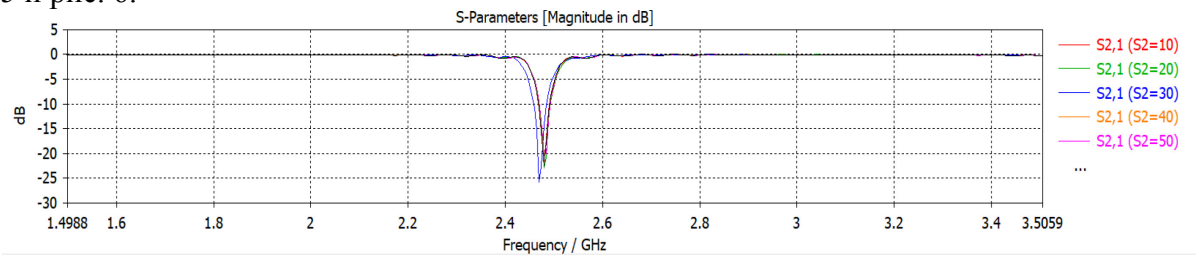


Рис. 5 - Коэффициенты передачи при различных положениях оптического волокна над плоскостью полосковой линии

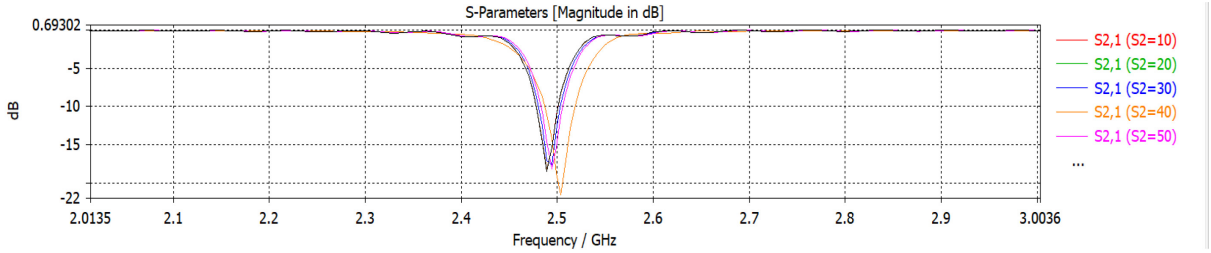


Рис. 6 - Коэффициенты передачи при различных положениях оптического волокна, утопленного в полосковую линию

При расположении волокна в верхнем слое диэлектрика, резонанс стал мощнее и остался на той же частоте. В обоих случаях мощность резонанса выросла, однако, при расположении волокна в верхнем слое диэлектрика, частота, на которой происходит резонанс не изменилась, а во втором случае, частота сдвинулась на 1 ГГц.

Заключение. Исходя из этого, оптимальной конструкцией микроволнового датчика является та, в которой оптическое волокно расположено в верхнем слое диэлектрика. Дальнейшие моделирования измерения влажности по методикам [3-5] будут проводиться, используя датчик данной конструкции, на установке [6-8].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

Список литературы

1. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (проблемы и реализации) / Под ред. Г.А Морозова и Ю.Е. Седельникова // Москва: Радиотехника, 2003.
2. *Смирнов С.В. и др.* Эффекты СВЧ воздействия// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2017. Т. 20. № 3-2. С. 26-30.
3. *Анфиногентов В.И. и др.* Математическое моделирование и экспериментальное исследование процесса микроволновой сушки органических отходов // Вестник НЦБЖД. 2020. № 3 (45). С. 142-149.
4. *Смирнов С.В. и др.* Разработка метода контроля параметров процесса микроволновой переработки отходов животноводства // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 11-1 (101). С. 67-73.
5. *Смирнов С.В. и др.* Исследование СВЧ технологических комплексов переработки твердых и жидких сред // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). С. 49.
6. *Кувшинов Н.Е. и др.* Радиофотонная система бесконтактного измерения распределения температур в обрабатываемом материале в условиях закрытой рабочей камеры лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2023. Т. 3. № 1. С. 56-81.
7. *Кувшинов Н.Е. и др.* Квазираспределенная волоконно-оптическая сенсорная сеть для контроля распределения интенсивности ЭМП и температуры в закрытой рабочей СВЧ-камере модернизированным калориметрическим методом // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2. № 2. С. 56-81.
8. *Кувшинов Н.Е. и др.* Радиофотонная система измерений распределения температур и интенсивности электромагнитного поля в рабочей камере лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 3 (51). С. 77-92.

2.3.3.

[1]Т.М. Закирьянов, [1]А.З. Петрова, [1]О.В. Никишина, [1]Д. Даххам,
[1]Г.А. Морозов, [2]С.В. Смирнов, [1]Ю.Е. Седельников

[1]Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ,
кафедра радиофотоники и микроволновых технологий,
[2]Казанский юридический институт МВД РФ,
кафедра экономики, финансового права и информационных технологий в деятельности ОВД,
Казань, OGMorozov@kai.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛА БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

За основу разрабатываемого кольцевого резонаторного датчика влажности материала, обеспечивающего технологический процесс микроволновой сушки куриного помета и конского навоза, была взята симметричная полосковая линия с резонансной частотой 2,48 ГГц. Модель датчика разработана в программном продукте электромагнитного моделирования CST Microwave Studio. Геометрические параметры итогового датчика будут результатом оптимизации размеров, полученных путём математического расчёта. Интересуемые параметры моделируемого датчика – это основная резонансная частота, добротность и значение коэффициента передачи на резонансной частоте (амплитуда резонанса) при различных физических размерах образцов, а также диэлектрической проницаемости при заданной влажности.

Ключевые слова: *микроволновый резонансный датчик влажности; распределение ЭМП; равномерность; влажность; автоматизация контроля.*

Введение. В качестве типа преобразовательного элемента датчика было предложено использовать ближнеполевые резонансные структуры в полосковом исполнении. Для того, чтобы избежать большие потери в объекте измерения в конструкции датчика должен быть применен метод возмущения. Резонансная структура данного датчика представляет собой кольцевой резонатор на основе симметричной полосковой линии [1, 2]. В верхнем экране моделируемого датчика будет реализована щель, данный элемент необходим для лучшей связи с объектом измерения. Для достижения лучшего эффекта в ходе моделирования резонатора исследуется наиболее подходящие значения разности между диаметрами кольцевой щели и кольцевого резонатора. Между верхним и нижним экраном симметричной полосковой линии расположен полосковый кольцевой резонатор. На расстоянии от кольцевого резонатора в одной плоскости расположен полосок. Волновое сопротивление возбуждающей резонатор линии составляло 50 Ом. В качестве верхнего и нижнего диэлектриков симметричной полосковой линии выступали листы фторопласта толщиной 1 мм.

Результаты моделирования. Предполагаемый резонаторный датчик до оптимизации геометрических размеров показан на рис. 1. На рис. 2 показан график S21 для оптимизации геометрических параметров датчика.

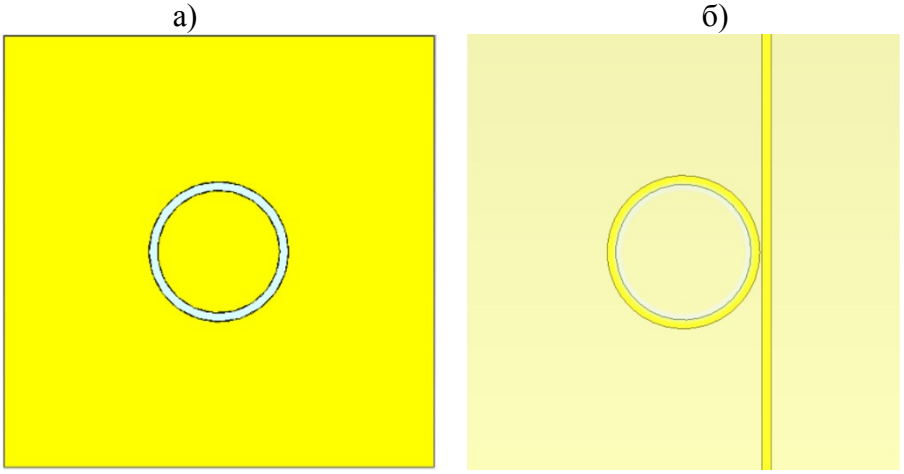


Рис. 1. Симметричная полосковая линия:
а) верхний экран, б) полосок и контур между экранами в диэлектрике [69]

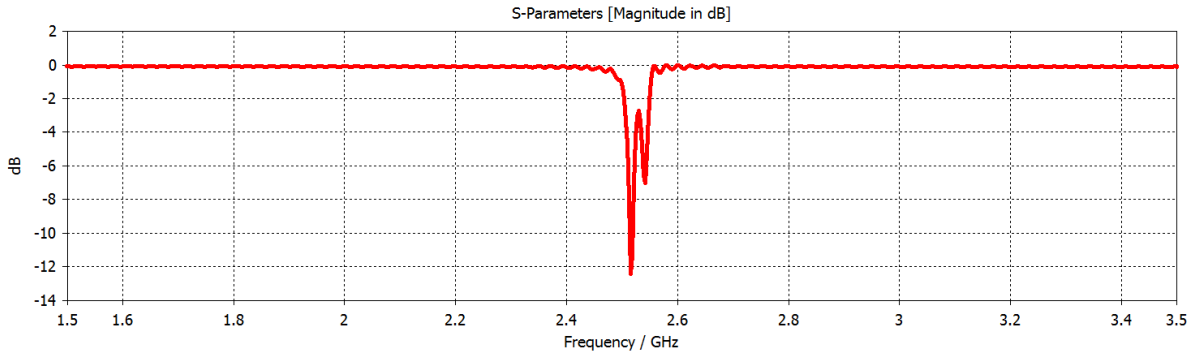


Рис. 2 - Коэффициент передачи резонатора, показанного на рис. 1

Чтобы добиться максимального резонанса рассматривались различные расстояния между полосковым кольцевым резонатором и полоском. Значения варировались от 0,1 до 1 мм с шагом 0,1мм. На рис. 3 показаны коэффициенты отражения при различных размерах щели. Из полученных графиков был выбран график с самым большим резонансом и с самой большой предполагаемой добротностью, данный результат получается при размерах щели 0,3 мм.

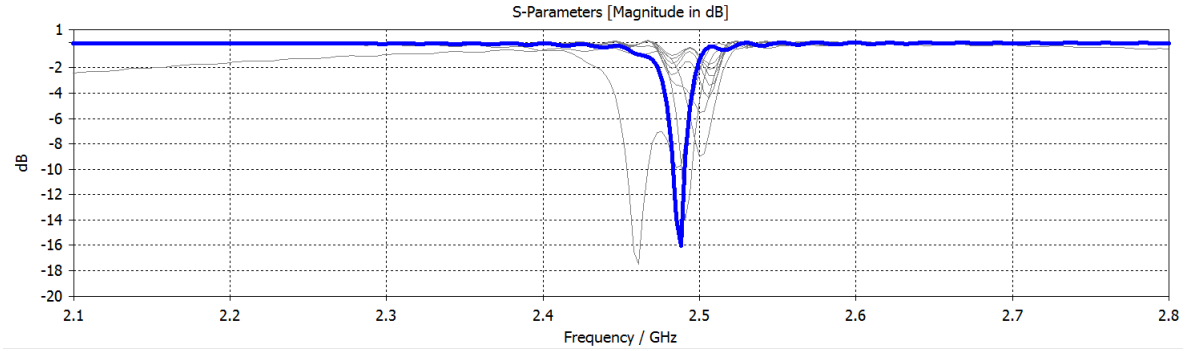


Рис. 3 - Коэффициенты отражения при различных размерах щели

Далее была произведена более точная подборка, результатом которой стал размер щели 0,35 мм (рис. 4) при использовании щели данного размера резонанс доходит до –20 дБ.

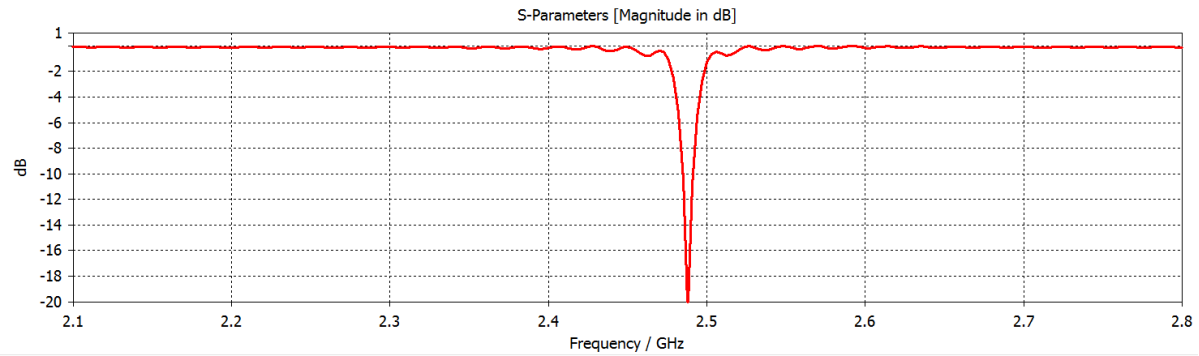


Рис. 4 - Коэффициенты отражения при размере щели 0,35 мм

Далее, для того, чтобы добиться резонанса на нужной частоте, менялся размер кольцевого резонатора, а именно размер средней линии кольца. Размеры менялись в диапазоне от 12 до 14 мм с шагом 0,2 мм. Ниже показаны коэффициенты отражения при различных размерах кольца (рис. 5).

Наиболее подходящим для дальнейшей подстройки оказался график выделенный на рис. 5 синим цветом. Внешний диаметр кольца составляет 13,3 мм. Внутренний – 11,68 мм.

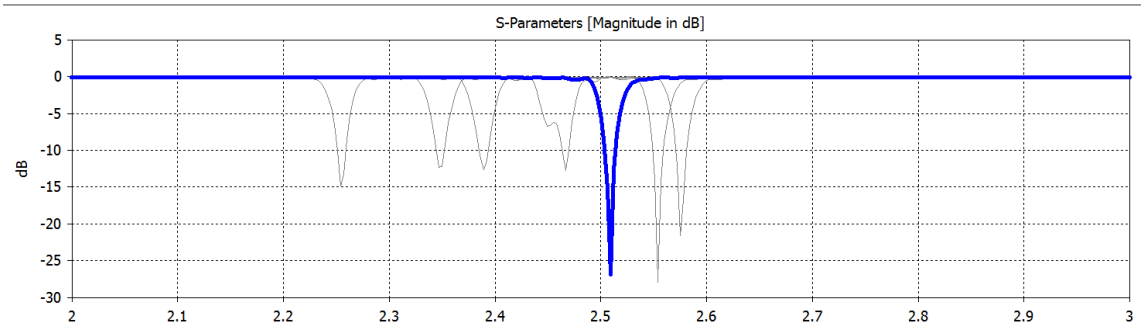


Рис. 5 - Коэффициенты отражения при различных размерах кольца.

Дальнейшая оптимизация резонатора проходила при помощи изменения разницы диаметров окружности верхней кольцевой щели и кольцевого резонатора. В ходе опыта разность менялась от 0 до 2 мм. Ниже показаны коэффициенты отражения при различных разностях между кольцами (рис. 6).

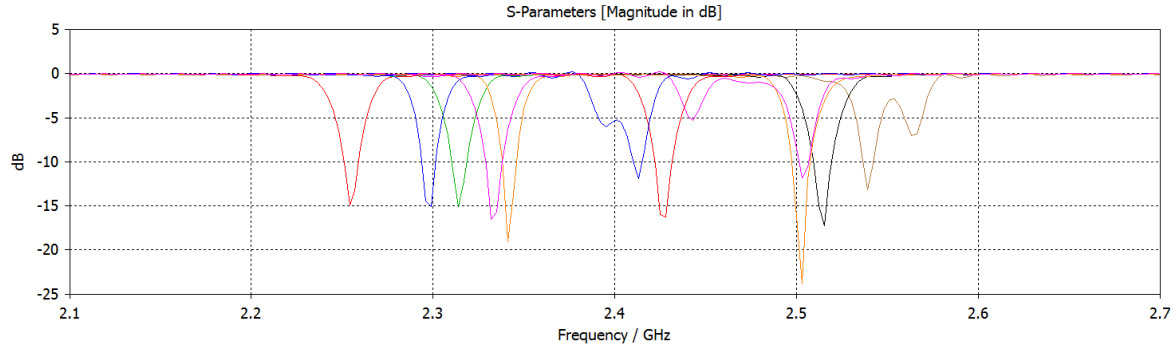


Рис. 6 - Коэффициенты отражения при различных размерах кольцевой щели.

Исходя из графиков, представленных на рис.2.6, можно сделать вывод, что изменения разности между диаметрами кольцевой щели и кольцевого резонатора влияет как на величину резонанса, так и на частоту, на которой происходит этот резонанс. Также процесс оптимизации данного параметра усложняет то, что изменения, наблюдаемые на графиках S21 носят нелинейный характер. При более тонкой настройке было выявлено, что оптимальная разность между диаметрами кольца резонатора и кольцевой щели составляет 1,93 мм.

График коэффициента передачи после оптимизации геометрических параметров показан на рис. 7. Резонанс оптимизированного датчика проходит на частоте 2,449 ГГц и доходит до –23,5 дБ.

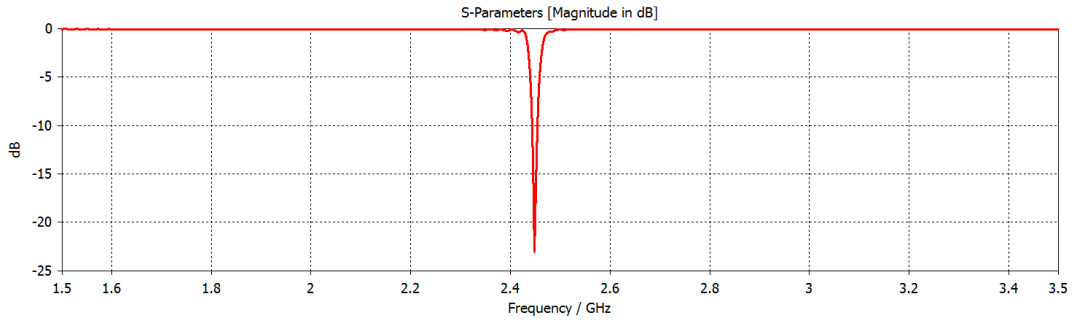


Рис. 7 - График коэффициента передачи после оптимизации геометрических параметров

Локальная область измерения в испытуемом материале соответствует области максимального электрического поля, как показано на рис. 8 и рис. 9. Как можно наблюдать из распределения поля, только часть его находится в области расположения объекта, тем самым реализуется метод возмущения. Таким образом, предлагаемый датчик может проводить измерения материалов с потерями с точностью, достаточной для технологического контроля [3-5].

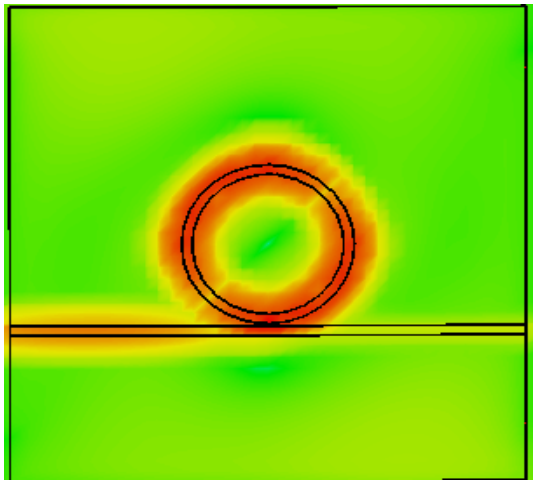


Рис. 8 - Модуль электрического поля при возбуждении кольцевого резонатора полосковой линией

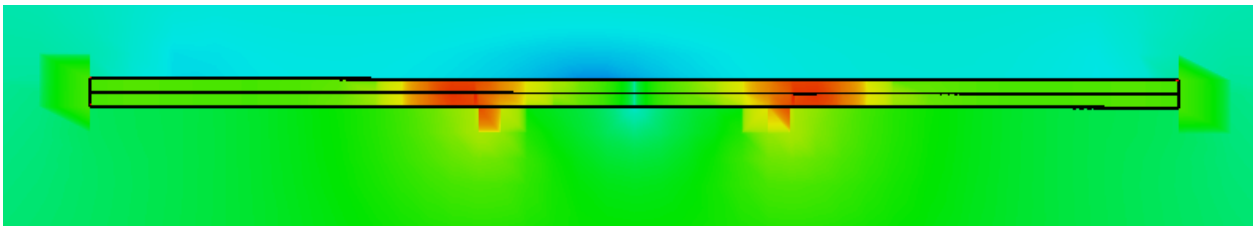


Рис. 9 - Модуль электрического поля в объекте измерения

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

Список литературы

1. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (проблемы и реализации) / Под ред. Г.А Морозова и Ю.Е. Седельникова // Москва: Радиотехника, 2003.
2. *Смирнов С.В. и др.* Эффекты СВЧ воздействия// Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2017. Т. 20. № 3-2. С. 26-30.
3. *Анфиногентов В.И. и др.* Математическое моделирование и экспериментальное исследование процесса микроволновой сушки органических отходов // Вестник НЦБЖД. 2020. № 3 (45). С. 142-149.
4. *Смирнов С.В. и др.* Разработка метода контроля параметров процесса микроволновой переработки отходов животноводства // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 11-1 (101). С. 67-73.
5. *Смирнов С.В. и др.* Исследование СВЧ технологических комплексов переработки твердых и жидких сред // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). С. 49.

2.3.3.

Ю.В. Зубкова канд. техн. наук, Ю.Р. Никитин канд. техн. наук, Д.Б. Зубков

ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»,
кафедра «Мехатронные системы»,
Ижевск, Россия, zubkov-jr@yandex.ru, doc_nikitin@mail.ru, stigeronn@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ПИ-РЕГУЛЯТОРОМ

Исследована модель системы управления мобильного робота с ПИ-регулятором. Разработана схема электрическая принципиальная системы управления на базе модуля ESP32. Выполнено имитационное моделирование управлением бесколлекторным двигателем постоянного тока в программе SimInTech.

Ключевые слова: *мобильный робот, математическая модель, ПИ-регулятор.*

Современные системы управления мобильными роботами представляют собой ключевое направление развития робототехники и автоматизированных систем. Эти технологии находят применение в самых различных областях - от промышленной автоматизации до сервисной робототехники и автономного транспорта. Актуальность разработки эффективных систем управления обусловлена растущими требованиями к автономности. На этом фоне разработка совершенных систем управления для мобильных роботов приобретает особую значимость, становясь ключевым фактором технологического прогресса [1–3].

Современный этап развития систем управления (2010-е - настоящее время) характеризуется интеграцией технологий машинного обучения и искусственного интеллекта. Современные алгоритмы управления способны не только обрабатывать данные от многочисленных сенсоров (лидаров, камер, инерциальных систем), но и обучаться на собственном опыте, адаптируясь к конкретным условиям эксплуатации [4-6].

На рисунке 1 представлена структурная схема системы управления двигателями мобильного четырехколесного робота с передним приводом.

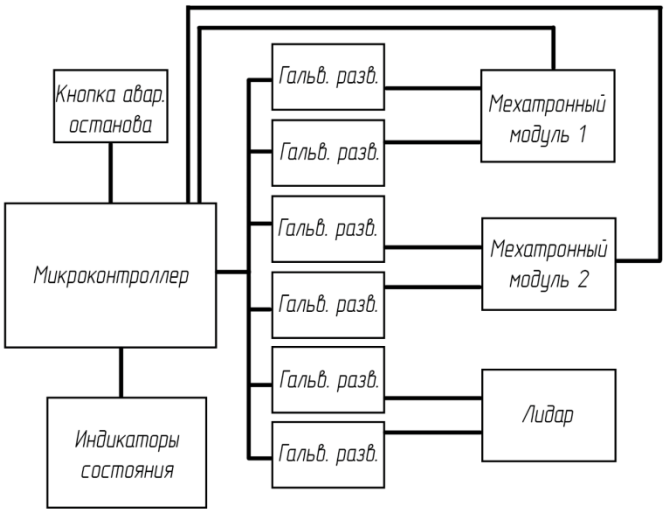


Рис. 1 – Структурная схема системы управления двигателями робота

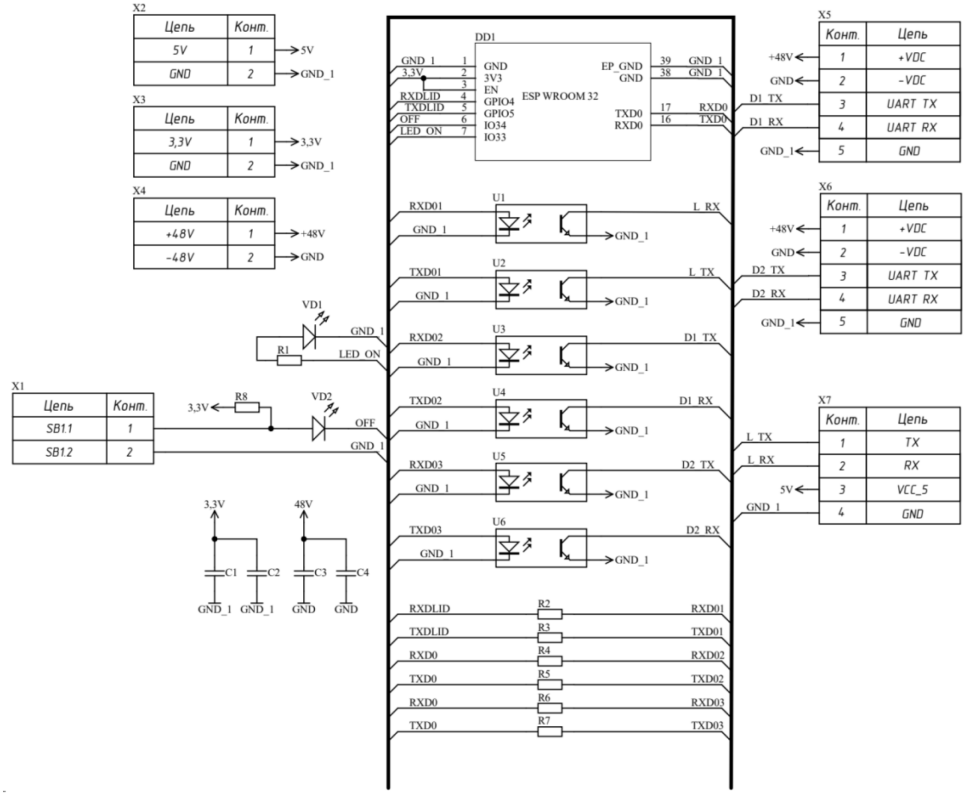


Рис. 2 – Принципиальная схема системы управления двигателями робота на базе модуля ESP32

У робота есть два режима работы: картографирование и навигация.

При активации функции «Картографирование» робот начинает автономное перемещение по помещению, используя лидар RPLIDAR A1 в качестве основного сенсора. Лидар непрерывно сканирует пространство с частотой 5.5 Гц, передавая данные о расстоянии до препятствий через UART на модуль ESP32. Микроконтроллер обрабатывает эти данные с помощью алгоритма SLAM (например, Gmapping), совмещая показания лидара с информацией о перемещении от энкодеров двигателей. Постепенно формируется точная карта помещения в формате Occupancy Grid, которая через Wi-Fi отправляется на ПК и сохраняется на сервере. ESP32 одновременно управляет моторами через драйвер, корректируя траекторию для полного покрытия площади, избегая столкновений благодаря реальному анализу данных лидара.

После загрузки сохраненной карты с сервера ПК робот получает координаты точек А и Б. Модуль ESP32 строит оптимальный маршрут, используя алгоритм A* или RRT, и начинает движение, динамически корректируя путь при обнаружении новых препятствий через лидар. Сигналы Step/Dir с ESP32 поступают на драйвер двигателей, который преобразует их в управляющие импульсы для моторов с учетом заданной скорости и ускорения. Лидар постоянно обновляет информацию о дистанции до объектов, позволяя роботу объезжать их без остановки (технология Dynamic Window Approach). Все данные о местоположении и состоянии системы дублируются на ПК через Wi-Fi для мониторинга. Таким образом, система обеспечивает точное перемещение груза по изученной территории, совмещая энергоэффективность и безопасность.

Для оценки динамики системы управления двигателем и проверки параметров регулятора была построена имитационная модель системы управления бесколлекторным двигателем в среде SimInTech. В модели реализован контур обратной связи по скорости вращения, в котором используется ПИ-регулятор, нацеленный на минимизацию ошибки между заданной и текущей скоростью вращения бесколлекторного двигателя.

Модель включает математическое представление электродвигателя, нагрузки, регулятора и внешних возмущающих воздействий. В процессе моделирования отслеживалось поведение системы при различных изменениях входного сигнала и действии внешних помех.

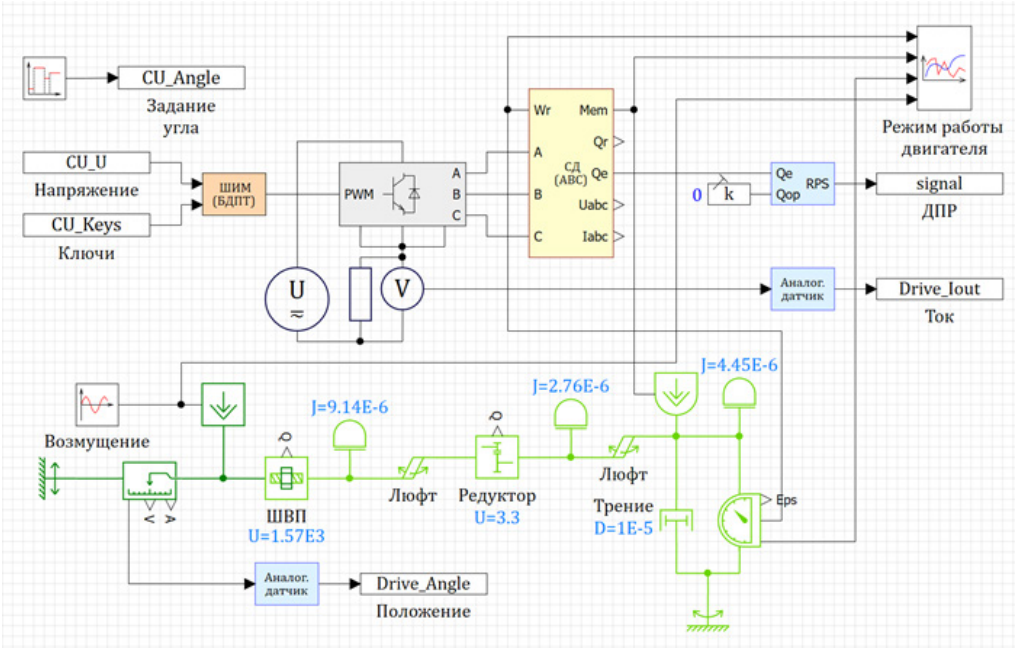


Рис. 3 – Модель системы управления бесколлекторным двигателем с ПИ-регулятором в SimInTech

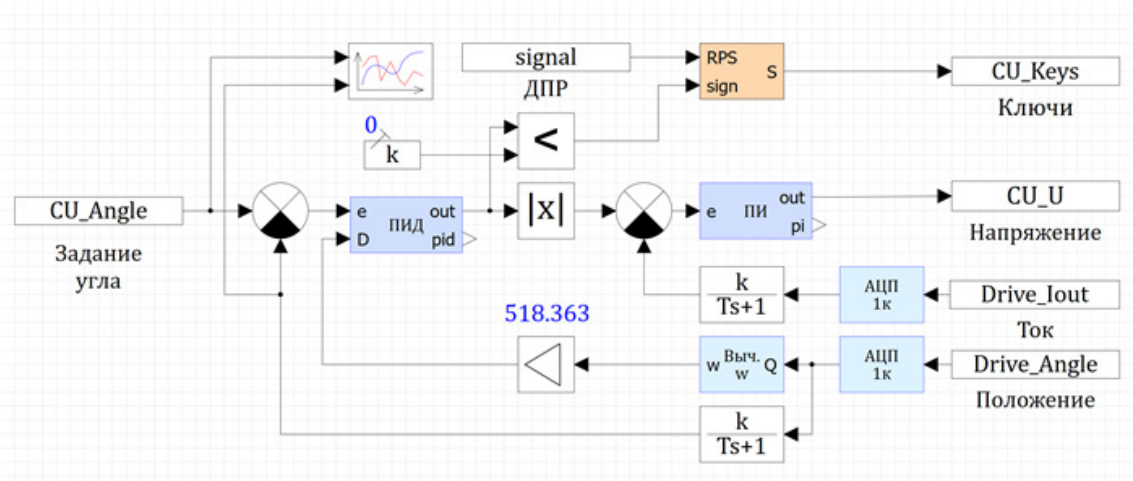


Рис. 3 – Продолжение

На рисунке 4 представлены результаты моделирования динамических характеристик системы управления, таких как скорость вращения, момент, угол отклонения и возмущающее воздействие.

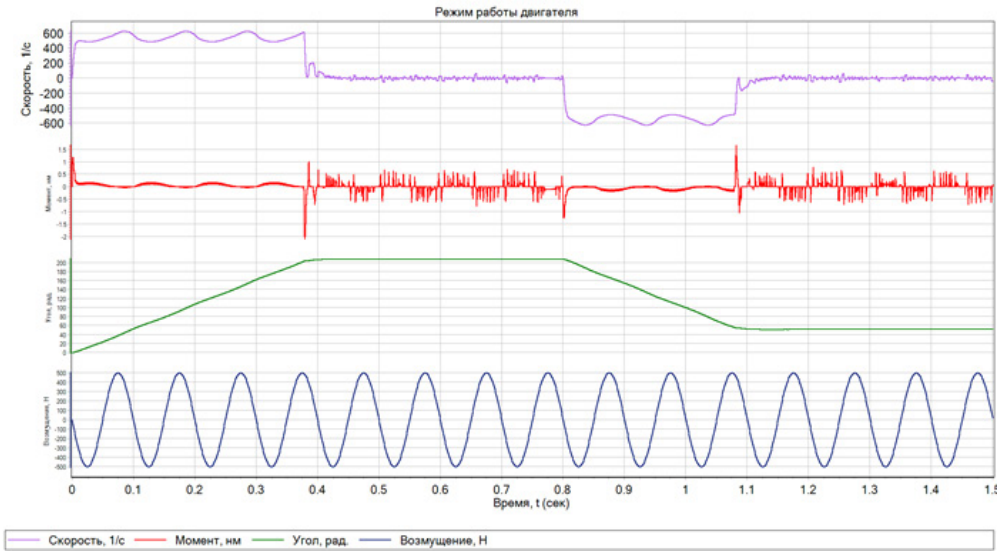


Рис. 4 – Динамика системы управления

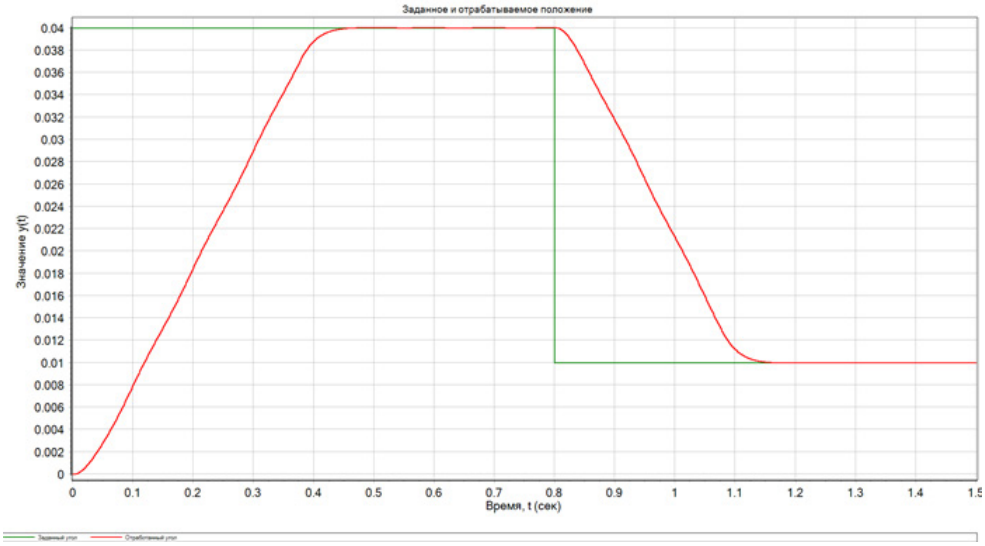


Рис. 5 – Сравнение заданного и отработанного углового положения

Анализируя поведение модели, можно отметить следующие особенности (рисунок 5): система стабильно работает при воздействии на неё внешних возмущений; скорость стабилизируется после незначительного переходного процесса; момент реагирует на колебания нагрузки, сохраняя физически допустимые значения; угол поворота меняется плавно, без резких скачков, в соответствии с задающим воздействием, возмущения в виде внешней силы приводят к отклонениям, которые быстро компенсируются системой. В итоге система сохраняет требуемые параметры движения без потери управляемости.

Проведя серию экспериментов, сравнение фактического и заданного положения показывает высокую точность отработки перемещения. Угловая скорость практически совпадает с заданной величиной. Перерегулирование минимально, переходный процесс короткий и устойчивый, после каждого изменения задания наблюдается быстрое восстановление до нового положения. Это подтверждает корректную настройку параметров регулятора и стабильность системы при резких изменениях управляющего сигнала.

Список литературы

1. *Саблина Г.В., Маркова В.А.* Настройка параметров ПИД-регулятора в системе с объектом второго порядка с запаздыванием // Автометрия. – 2022. –Т.58, №4. – С.110-117.– DOI 10.15372/AUT20220411.–EDN RIZPWY.

2. *Никитин Ю.Р., Зубкова Ю.В., Зубков Д.Б.* Планирование пути мобильного робота с учетом препятствий // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2025. – № 2(30). – С. 25-34. – EDN JFOREB.

3. *Тачков А.А., Козов А.В., Курочкин С.Ю. [и др.]*. Реализация траекторного регулятора наземного робототехнического комплекса на основе модельного прогнозирующего управления // Робототехника и техническая кибернетика. – 2022. – Т. 10, № 1. – С. 43-54. – DOI 10.31776/RTCJ.10105. – EDN CSJJUM.

4. *Трефилов С.А., Никитин Ю.Р., Пономарев Д.А.* Исследование цифрового дискретного быстродействующего полосового фильтра высоких порядков на процессоре TMS320F28377D для навигации мобильных роботов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2024. – Т. 27, № 4. – С. 55-69. – EDN HIIVHS.

5. *Božek P., Nikitin Y.* The development of an optimally-tuned PID control for the actuator of a transport robot // Actuators. – 2021. – Vol. 10, No. 8. – DOI 10.3390/act10080195. – EDN DLLKYL.

6. Research on the Adaptive PID Speed Control Method for Hub Motors / J. Zhang, Ch. Li, Q. Jia, R. Gao // Mobile Information Systems. – 2022. – Vol. 2022. – P. 4979824. – DOI 10.1155/2022/4979824. – EDN IEGMQO.

2.3.3.

А.А. Казин

МИРЭА Российский технологический унивеситет,
Институт Радиоэлектроники и Информатики, кафедра Телекоммуникаций,
Москва, pil9rims@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОМОДУЛЕЙ 433 МГЦ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ СБОРА ДАННЫХ

В работе рассмотрено использование радиомодулей 433 МГц в системах по сбору данных. Предложено решение, предоставляющее возможность дистанционной передачи значений, тем самым повышая удобство работы с оборудованием. Решение протестировано на учебном оборудовании включающим в себя: платы Arduino UNO, термопары, радиомодули 433 МГц. Также для создания системы сбора данных было написано программное обеспечение для плат Arduino UNO, в среде Processing разработано ПК приложение анализа и обработки данных, разработан собственный метод передачи данных. Функционал ПК приложения включает в себя: обработку и визуализацию приходящих значений.

Ключевые слова: *микроконтроллер, радиомодуль 433 Мгц, Arduino UNO, Arduino IDE, Processing.*

Современные системы сбора данных играют ключевую роль в промышленности, особенно при работе с ответственным оборудованием. Их основная функция заключается в непрерывном контроле рабочих параметров и своевременном оповещении о возможных неисправностях. Внедрение автоматизации в такие системы значительно повышает их эффективность.

При проектировании подобных систем одной из ключевых задач была разработка универсальной и удобной платформы, которую можно относительно недорого адаптировать под различные отрасли промышленности.

Первостепенной задачей стояло интеграция радиомодулей 433 МГц в системы сбора данных.

Работа с оборудование на производстве всегда связанна с определенным риском для сотрудников, находящихся в непосредственной к нему близости. Для решения этой проблемы предлагается использовать удаленную передачу данных при помощи радиомодулей.

Разработка и интеграция

При использовании радиомодулей в системах сбора данных важно учитывать ряд параметров. В первую очередь таковыми являются надежность, доступность и уровень сигнала. При разработке системы сбора данных выбор пал на радиомодуль 433 МГц.

Рис. 1 – Радиомодуль 433 МГц

Одно из главных достоинств этого радиомодуля является доступность. Возможность найти его в любом специализированном магазине, а также цена делают его одним если не самым доступным массовым решение при такой разработке. Также важно отметить и частоту, на которой он работает. Сигнал, передающийся на частоте 433 МГц, действует в большем диапазоне по сравнению с более распространенными такими как 2,4 ГГц, а также лучше проходит через объекты, мешающие распространению сигнала. Его характеристики полностью отвечают требованиям для создания надежной передачи данных.

При создании системы сбора данных основным инструментом стал микроконтроллер Arduino UNO в сочетании со средой разработки Arduino IDE. Такой выбор обусловлен рядом значимых преимуществ, включая простоту освоения, открытый исходный код программного обеспечения, широкую доступность компонентов и их экономическую выгодность.

Для программирования системы использовался упрощенный вариант языка C/C++, встроенный в Arduino IDE. Тестирование и отладка проводились на специально разработанном макете, который включал передатчик на базе Arduino UNO с четырьмя температурными датчиками и радиомодулем 433 МГц (Рис. 2), приемное устройство с аналогичным микроконтроллером и радиомодулем (Рис. 2), а также специализированное приложение для персонального компьютера. Обмен данными между устройствами осуществлялся по радиоканалу, а связь с компьютером - через последовательный интерфейс UART.

Программная реализация системы состоит из двух взаимосвязанных частей. Код передатчика отвечает за сбор показаний с датчиков и их подготовку к передаче. Данные с аналоговых входов сначала преобразуются в 8-битный беззнаковый формат (uint8), а затем упаковываются в 16-битные значения (uint16), где младший байт содержит собственно данные, а старший - идентификатор аналогового входа. Такая организация позволяет маркировать информацию и обеспечивает ее корректную интерпретацию на стороне приемника. Все подготовленные данные передаются единым потоком по радиоканалу.

Приемное устройство выполняет функции промежуточного звена, принимая радиосигнал и передавая информацию на компьютер через последовательный интерфейс. Программный обработчик на стороне ПК использует эти маркеры для правильной интерпретации поступающей информации и ее последующего отображения.

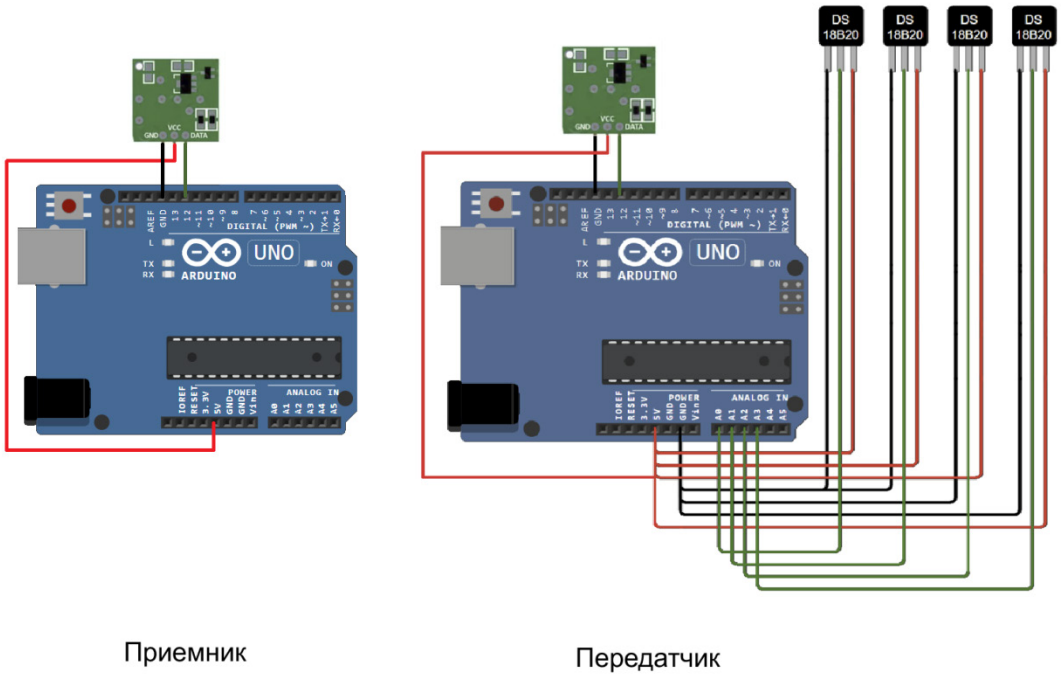


Рис. 2 – Схема приемника и передатчика

Кроме того, реализована передача данных через последовательный интерфейс UART с использованием специального соединительного кабеля, подключенного к рабочей станции оператора.

Декодирование принятых данных

Разработанное программное обеспечение представляет собой комплексное решение для обработки, отображения и архивации данных, поступающих с контролируемого оборудования. В основе системы лежит среда разработки Processing, построенная на языке Java. Выбор данной платформы обусловлен ее открытостью, высокой производительностью и наличием богатого набора библиотек для создания интерактивных интерфейсов.

Графическая часть приложения реализована в виде многофункциональной панели управления, сочетающей динамически обновляемые графики, цифровые индикаторы текущих значений и систему визуальных оповещений.

Ядро системы обработки данных построено по модульному принципу и включает несколько взаимосвязанных компонентов. Первичный модуль отвечает за прием и верификацию входящего потока данных, обеспечивая проверку целостности информации и ее соответствия ожидаемому формату. Затем данные поступают в декодирующий модуль, где происходит их распаковка, преобразование и распределение по соответствующим каналам обработки.

Для хранения и управления информацией в системе реализована сложная иерархическая структура данных, основанная на динамических массивах с кольцевой организацией.

В процессе разработки особое внимание было уделено вопросам надежности и отказоустойчивости.

Разработанное решение успешно прошло тестирование в реальных производственных условиях, продемонстрировав высокую стабильность работы и эффективность в задачах сбора данных критически важного оборудования.

Проверка работоспособности

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном макете, созданном на базе микроконтроллерных плат Arduino с последующей передачей информации в специализированное программное обеспечение, разработанное на платформе Processing.

В процессе испытаний особое внимание уделялось работе подсистемы визуализации данных. Разработанное программное обеспечение обеспечивает отображение параметров в виде динамически обновляющихся графиков в отдельном окне пользовательского

интерфейса. Графическое представление информации включает две ключевые оси: временную шкалу и шкалу измеряемых величин.

Проведенные испытания подтвердили работоспособность всех компонентов системы: от корректного сбора данных с датчиков до их визуализации и сохранения.

Заключение

Разработана собственная система сбора данных с применением радиомодуля 433 МГц. Данная разработка показала свою эффективность в тестах и радиомодуль доказал свою надежность.

Дальнейшее развитие такое системы предполагает дальнейшее масштабирование и автоматизирование. Также важно проведение тестирования системы на реальном оборудовании для дальнейшей модификации.

Список литературы

1. *Бондарь А.А.* Исследование алгоритма декодирования стираний с выбором / А. А. Бондарь // Системы компьютерной математики и их приложения: материалы XXI Международной научной конференции. – Смоленск : Издательство СмолГУ, 2020. – Вып. 21. – С. 11–19.

2. *Бондарь А.А.* Исследование различных алгоритмов декодирования стираний для повышения помехоустойчивости цифровой системы связи / А. А. Бондарь // Системы компьютерной математики и их приложения: материалы XXII Международной научной конференции. – Смоленск : Издательство СмолГУ, 2021. – Вып. 22. – С. 37–42.

3. *Бондарь А.А.* Система мониторинга производственной линии с беспроводной передачей данных / А. А. Бондарь, А. А. Казин, М. Д. Глотов // Материалы VIII международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» «Радиоинфоком-2024». – Москва : РТУ МИРЭА, 2024. – С. 265–267.

2.3.3.

[1,2]М.А. Карпов, [2]Е.А. Морозова

[1]ФИАН - Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН,
[2]МИРЭА – Российский технологический университет,
Институт радиоэлектроники и информатики,
kmorozova12@mail.ru

ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ QAM-СИГНАЛОВ В РАДИОКАНАЛЕ С ЗАМИРАНИЯМИ НА ИМИТАЦИОННОМ ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ

В статье рассмотрен вопрос оценки помехоустойчивости QAM-сигналов в радиоканале с замираниями Рэлея и Райса с помощью лабораторного стенда. Описан алгоритм формирования сигналов, настройки модели радиоканала и методика оценки битовой ошибки. Описанный метод позволяет производить оценку помехоустойчивости связной радиоаппаратуры в лабораторных условиях.

Ключевые слова: *M-QAM, BER, Keysight Propsim, отношение сигнала к шуму (SNR), битовая ошибка (BER), замирания, многолучевость, канал Рэлея, канал Райса.*

Введение. С развитием технологий и увеличением объема передаваемой информации, требования к системам связи становятся все более жесткими. Квадратурная амплитудная модуляция (QAM) является ключевым методом модуляции, широко применяемым в современных системах связи, включая стандарт LTE [1].

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью в тестировании качества приемо-передающих устройств, использующих QAM-сигналы в различных условиях, например в городской застройке или в сельской местности. Однако не всегда имеется возможность тестировать устройства в полевых условиях.

Описание лабораторного стенда. В работе используется лабораторный стенд на базе генератора сигналов и спектрального анализатора, подключенные через эмулятор среды распространения Keysight Propsim F8 (рис. 1).

Рис. 1 - Лабораторный стенд

В качестве генератора сигналов в работе используется модель Keysight M9505A. Это модульный генератор сигналов, предназначенный для задач тестирования современных систем связи. В качестве спектрального анализатора в работе используется модель Rigol

RSA5032N с встроенной функцией оценки битовой ошибки (BER)

Так же, в работе используется эмулятор среды распространения Keysight Propsim F8. Это радиочастотный эмулятор каналов связи, способный воспроизводить реальные условия распространения сигналов, включая замирания, многолучевое распространение, доплеровские сдвиги и другие эффекты, характерные для радиоканалов.

Описание исследуемых моделей каналов. Канал Рэлея представляет собой частный случай канала Райса, когда отсутствует прямая видимость. В таком канале сигнал формируется исключительно за счёт многолучевого распространения такой сценарий характерен для городских условий с плотной застройкой, где прямая видимость часто отсутствует [2,3,4].

Канал Райса учитывает наличие прямого луча на фоне рассеянных компонент. Благодаря присутствию устойчивой LOS-компоненты колебания сигнала в таком канале менее выражены, а средний уровень сигнала выше. Такие условия типичны для открытых пространств, спутниковой связи и микроволновых линий передачи [2,3,4].

В ходе исследования были разработаны модели Райсовского и Рэлеевского каналов, с 3,4,5 лучами соответственно.

Методика измерения битовой ошибки. Для оценки качества сигнала использовался режим Bit Error Rate (BER) на спектральном анализаторе Rigol RSA5032N. Процесс измерения включал следующие этапы:

1. Подготовка тестового сигнала:

1.1. В генераторе формировалась битовая последовательность с пилотными символами для синхронизации.

1.2. Для 16-QAM и 32-QAM создавались XML-файлы с битовой последовательностью с генератора, которые загружались в спектральный анализатор.

2. Настройка анализатора:

2.1. Активация режима VSA (Vector Signal Analysis) и подрежима BER.

2.2. Указание типа модуляции (16/32-QAM) и длины последовательности в соответствии с файлом конфигурации.

2.3. Выбор файла для подсчета битовой ошибки.

3. Выбор модели канала: Для каждого типа канала (Рэлеевский/Райсовский) и количества лучей (3, 4, 5) проводилось фиксирование BER и SNR.

4. Подведение результатов: Оценка помехоустойчивости производилась на спектральном анализаторе Rigol в режиме BER. SNR/ОСШ рассчитывались в режиме DMA с помощью встроенного блока в RIGOL с усреднением при количестве экспериментов 100.

Результаты оценки помехоустойчивости

По результатам измерения качества приема сигнала можно сделать вывод, что при увеличении количества отраженных лучей падает среднее значение SNR и растёт BER.

Для 16-QAM увеличение числа лучей с 3 до 5 снижало SNR на 1,9–2,3 дБ в Райсовском канале и на 2,3 дБ в Рэлеевском.

Сигнал 32-QAM показал большую чувствительность: падение SNR на 2,3 дБ (Райс) и 2,1 дБ (Рэлей) при тех же условиях.

Таблица 1 - Зависимость SNR и BER от количества лучей для 16-QAM в Райсовском и Рэлеевском каналах

16-QAM						
Вид канала	Райс (прямая видимость)			Рэлей (отсутствие прямой видимости)		
Количество отраженных лучей	3	4	5	3	4	5
SNR/ОСШ, дБ	10,1	9,3	8,2	8,1	7,4	5,9
BER	0,009	0,021	0,048	0,045	0,064	0,098

Таблица 2 - Зависимость SNR и BER от количества лучей для 32-QAM в Райсовском и Рэлейном каналах

32-QAM						
Вид канала	Райс (прямая видимость)			Рэлей (отсутствие прямой видимости)		
Количество отраженных лучей	3	4	5	3	4	5
SNR/ОСШ, дБ	10,2	9,0	8,3	7,9	7,3	5,7
BER	0,005	0,032	0,067	0,063	0,089	0,103

Заключение. Результаты исследования показывают устойчивую взаимосвязь между качеством приема сигнала и условиями его распространения. При анализе полученных результатов выявлено снижение среднего значения SNR на 3-5 дБ для каждого дополнительного отраженного луча, что вызывает возрастание BER, что ярко выражено при сравнении 16-QAM и 32-QAM, где более высокая плотность сигнального созвездия требует увеличения SNR на 2-3 дБ для поддержания аналогичных показателей BER.

Практическая значимость работы заключается в разработке методики оценки помехоустойчивости сигналов, которая может быть применена в дальнейших исследованиях и инженерных разработках.

Список литературы

1. *Колесникова А.В.* Модуляция и демодуляция QAM сигналов / А. В. Колесникова // Исследование различных направлений современной науки : Сборник материалов XXXVII-ой международной очно-заочной научно-практической конференции. В 3-х томах, Москва, 18 октября 2023 года. – Москва: Научно-издательский центр "Империя", 2023. – С. 50-52. – EDN CWYNMZ.

2. Классификация и оценивание помех при использовании QAM сигналов / Р. В. Геранин, В. В. Киселев, А. А. Львов [и др.] // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 4, № 2(50). – С. 10-12. – EDN NXOGDZ. Владимир Лебедев. Модуляция OFDM в радиосвязи // Радиолюбитель. – 2008. – № 9. – С. 36 – 40. – Текст: непосредственный.

3. *Малышев И.И.* Анализ помехоустойчивости схемы некогерентного выделения информации из шумоподобного сигнала в канале с замираниями / И. И. Малышев, В. И. Шестопалов, А. И. Мордовин // Теория и техника радиосвязи. – 2020. – № 2. – С. 35-39. – EDN KLORDP.

4. *Назаров Л.Е.* Исследование помехоустойчивости оптимального посимвольного приема сигналов с корректирующим кодированием в полях Галуа для каналов с замиранием / Л. Е. Назаров, В. В. Батанов // Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA - 2024 : Доклады XXVI Международной конференции, Москва, 27–29 марта 2024 года. – Москва: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2024. – С. 9-12. – EDN WFZDYI.

2.3.3.

В.С. Кондратьев, Ю.Е. Седельников, Р.М. Зайнутдинов,
А.В. Михеев, Е.А. Селюков, О.В. Никишина, В.В. Садчиков

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, кафедра радиофотоники и микроволновых технологий,
Казань, OGMorozov@kai.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАССИВА МИКРОВОЛНОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ

В данной статье представлен дизайн-проект массива микроволновых датчиков для тестирования качества воды. Массив датчиков состоит из пяти элементов, каждый из которых спроектирован на основе микрополосковой линии передачи, нагруженной комплементарным разрезным кольцевым резонатором (CSRR), резонирующим на разной частоте в диапазоне от 1 ГГц до 10 ГГц. После проведенных теоретических расчетов был сформирован образ отдельного датчика в программе электродинамического моделирования и синтезирован их массив. В заключительном разделе было исследовано изменение параметра S_{21} массива датчиков в зависимости от диэлектрической проницаемости водных растворов.

Ключевые слова: *микроволновая сенсорика; резонансный датчик; комплементарным разрезным кольцевым резонатором; последовательный массив датчиков; диэлектрическая проницаемость воды.*

Введение. Традиционные методы оценки качества питьевой воды, такие как химический анализ, могут занимать много времени и средств. Они также требуют использования опасных химических веществ, которые могут представлять опасность для здоровья человека и окружающей среды. Микроволновые системы предлагают многообещающую альтернативу традиционным методам оценки качества питьевой воды [1-3]. Микроволновые системы являются быстрыми, неразрушающими и не требуют использования опасных химических веществ. Один из перспективных подходов к использованию микроволновых систем для оценки качества питьевой воды основан на использовании кольцевых резонаторов. Кольцевые резонаторы представляют собой небольшие резонансные структуры, которые можно использовать для измерения диэлектрических свойств воды. На диэлектрические свойства воды влияет присутствие загрязняющих веществ, поэтому, измеряя диэлектрические свойства воды, можно косвенно измерить концентрацию загрязняющих веществ в воде. Массив разных датчиков может поэлементно реагировать на каждый из загрязнителей, что является его преимуществом.

Расчет массива микроволновых кольцевых датчиков. Конструкция линии передачи датчика (рис. 1) реализована и оценена с помощью методики моделирования с представленными ниже исходными данными.

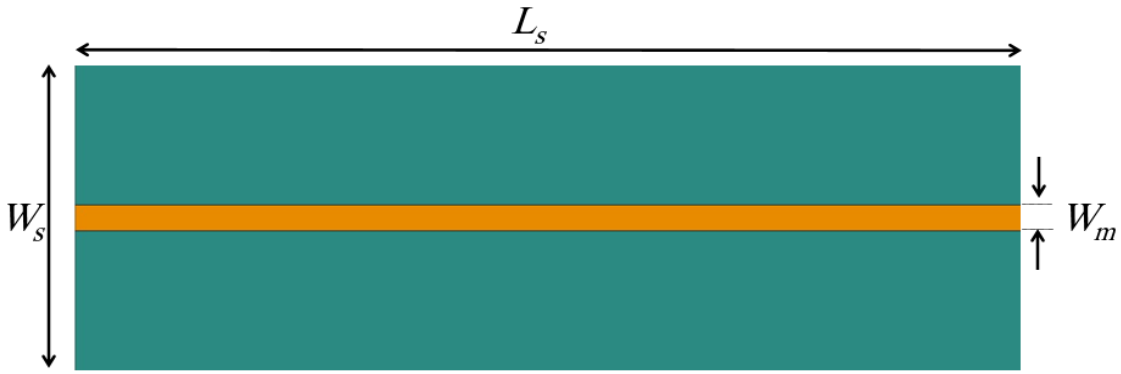


Рис. 1 - Массив микроволновых резонаторов:
(а) – вид спереди; (б) – вид сзади

Исходные данные:

- подложка Rogers RO4350 с ε_r= 3,66 и $tg\ \delta$ = 0,0031;
- волновое сопротивлением 50 Ом;
- толщина подложки 0,75 мм;
- толщина металлизации 0,035 мм;
- рабочие частоты f=1 ГГц, 4 ГГц, 6 ГГц, 8 ГГц, 9 ГГц;
- ширина подложки $W_s = 20$ мм;
- длина подложки $L_s = 56$ мм;

Для расчета ширины микрополосковой линии передачи W_m, показанного на рис.1(а), мы используем формулу для расчета волнового сопротивления Z:

$$Z = \frac{314}{\sqrt{\varepsilon}} * \left(1 + \frac{W_m}{h}\right), \quad (1)$$

где Z – волновое сопротивление, Ом; ε – диэлектрическая проницаемость, Ф/м; W_m – ширина микрополосковой линии передач, мм; h – толщина подложки.

Исходя из (1) мы можем выразить значение W_m:

$$W_m = h * \left(\frac{314}{z\sqrt{\varepsilon}} - 1\right), \quad (2)$$

получив $W_m = 1{,}712$ мм.

Для проверки наших расчетов мы прибегли к использованию программы TxLine, окно интерфейса которой показано на рис. 2.

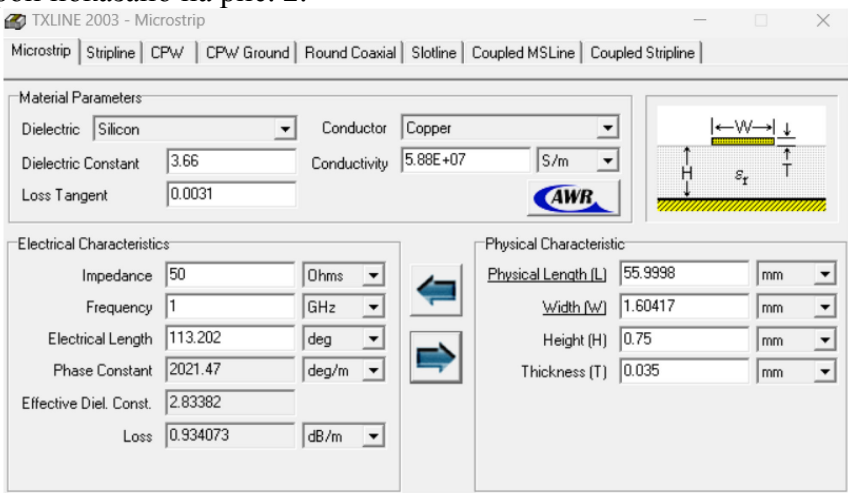


Рис. 2 - Полученные значения параметров в программе TxLine

Расчеты, полученные в программе TxLine, соответствуют нашим первоначальным расчетам в пределах заданной погрешности. В любом случае на следующих этапах будет проводиться оптимизация, для получения более точных результатов.

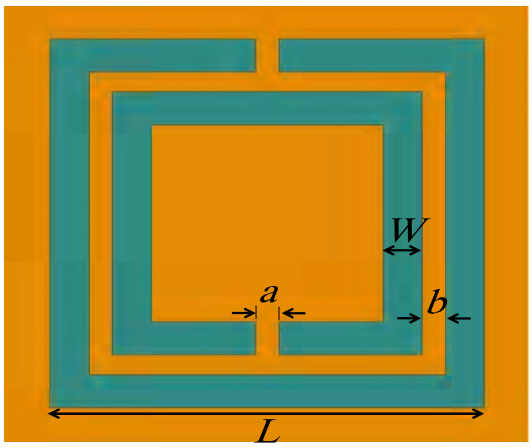


Рис. 3 - Параметрическая модель каждого CSRR

На рис. 3 показаны параметры конструкции каждого датчика, включая длину внешнего кольца L, ширину колец W, расстояние между соседними кольцами b и ширину узких линий. Как правило, большое значение L соответствует более низкой резонансной частоте, а с увеличением W резонансная частота уменьшается.

После проведенных теоретических расчетов мы производим построение получившегося датчика в программе электродинамического моделирования рис. 4.

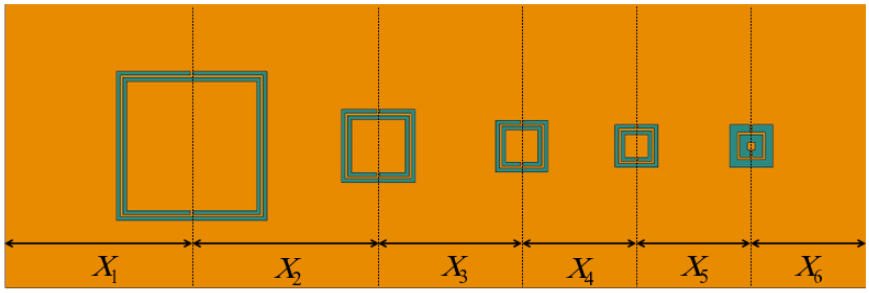


Рис. 4 - Массив микроволновых датчиков

Проектирование и оптимизация массива CSRR датчиков. Последовательный кольцевой резонатор смоделирован в форме квадрата и имеет следующие исходные геометрические размеры (табл. 1), которые мы использовали при моделировании:

Таблица 1. Исходные параметры для одного из резонаторов

Размеры	W (мм)	L (мм)	a (мм)	b (мм)
Сенсор 1	0,27	10,5	0,16	0,16

На первых этапе моделирования мы создали один датчик (рис. 5), находящийся на рассчитанной нами подложке с линией передачи и измерили его получившиеся параметры S_{21} (рис. 6).

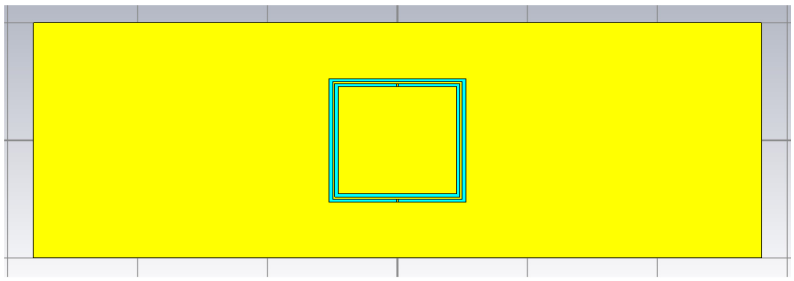


Рис. 5 - Смоделированный CSRR

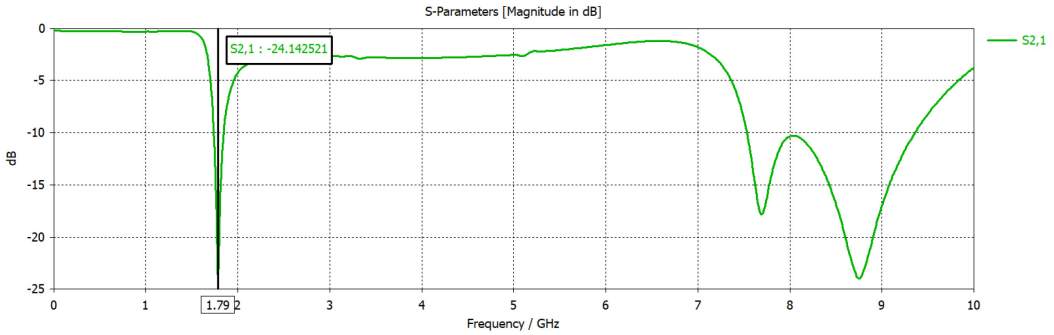


Рис. 6 - График измерения параметра S_{21} для рассчитанного датчика CSRR

По результатам измерения было выявлено, что резонансная частота в воздухе при заданных нами размерах составляет 1,79 ГГц. При этом распределение электромагнитного поля сконцентрировано по площади датчика (рис. 7).

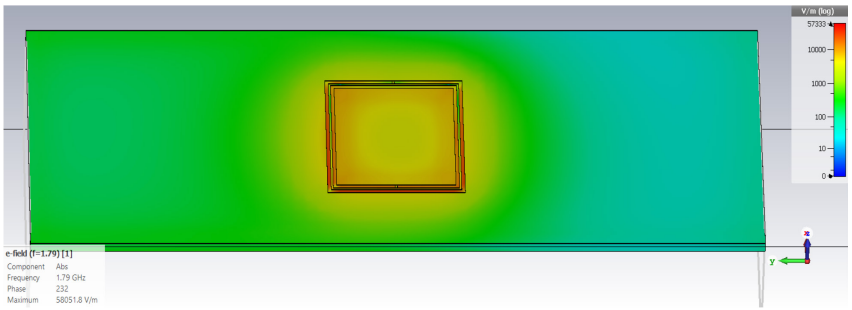


Рис. 7 - Распределение электромагнитного поля на частоте 1,79ГГц

После проведенного первого этапа моделирования и оптимизации геометрических параметров мы построили массив датчиков. По получившимся результатам видно, что модель надается в. Под оптимизацией подразумевается изменения размеров *a, b, W* и *L*.

На рис. 8 изображена первоначальный неоптимизированная модель массива датчиков и получившиеся для них параметры S_{21} на рис. 9.

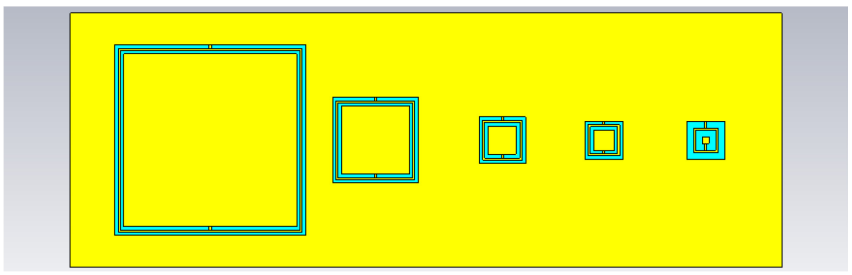


Рис. 8 - Неоптимизированный массив резонаторов, рассчитанный в программе электродинамического моделирования

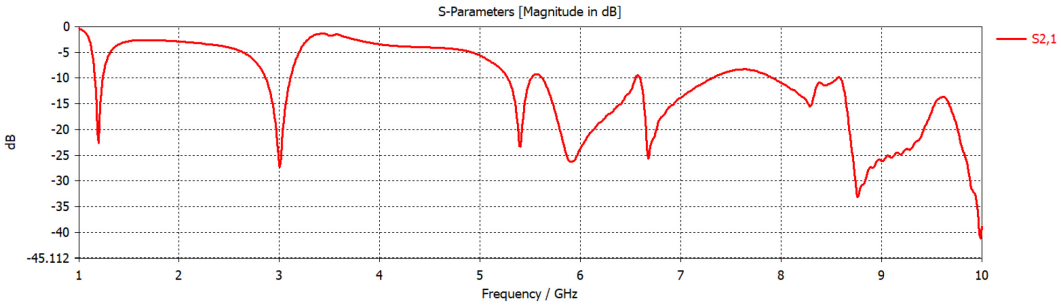


Рис. 9 - Коэффициенты передачи S_{21}, полученный для неоптимизированной модели

На рис. 10 показаны графики параметра S_{21}, получившиеся для первоначального массива датчиков с разными размерами.

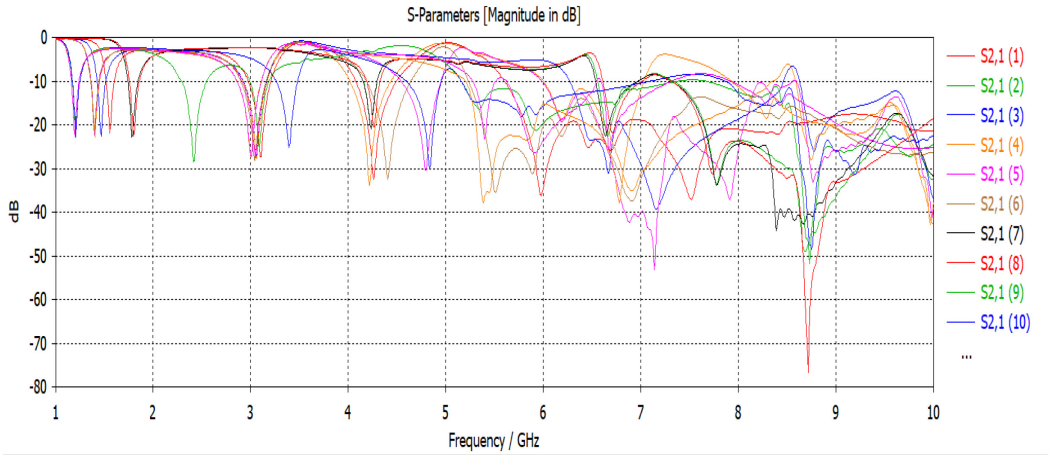


Рис. 10 - Семейство графиков параметра S_{21}, полученных путем изменения геометрических параметров датчика

Исходя из результатов полученных при изменении геометрических параметров резонаторов, мы выбрали подходящие для нас размеры, которые показаны в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2 - Размеры разработанных CSRR

Размеры	f_r(ГГц)	W (мм)	L (мм)	a (мм)	b (мм)
Сенсор 1	1,78	0,27	10,5	0,16	0,16
Сенсор 2	4,23	0,27	5,15	0,16	0,16
Сенсор 3	6,66	0,27	3,65	0,16	0,16
Сенсор 4	7,83	0,27	3	0,16	0,16
Сенсор 5	8,95	0,54	3	0,16	0,16

Таблица 3 - Расстояния между отдельными CSRR (аналогично рис. 4)

X_1 (мм)	X_2 (мм)	X_3 (мм)	X_4 (мм)	X_5 (мм)	X_6 (мм)
11	13	10	8	8	6

На рис. 11 показан оптимизированный и построенный в программе электродинамического моделирования массив датчиков, который является более подходящим для дальнейших исследований.

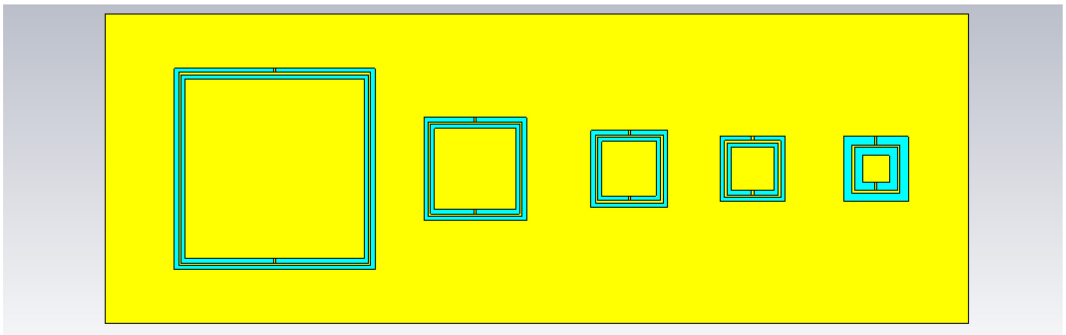


Рис. 11 - Оптимизированный массив резонаторов, рассчитанный в программе электродинамического моделирования

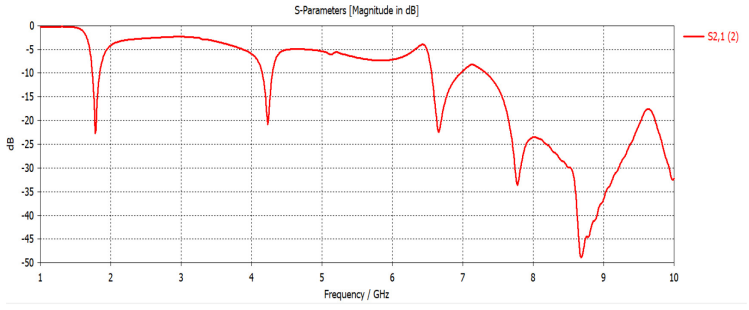
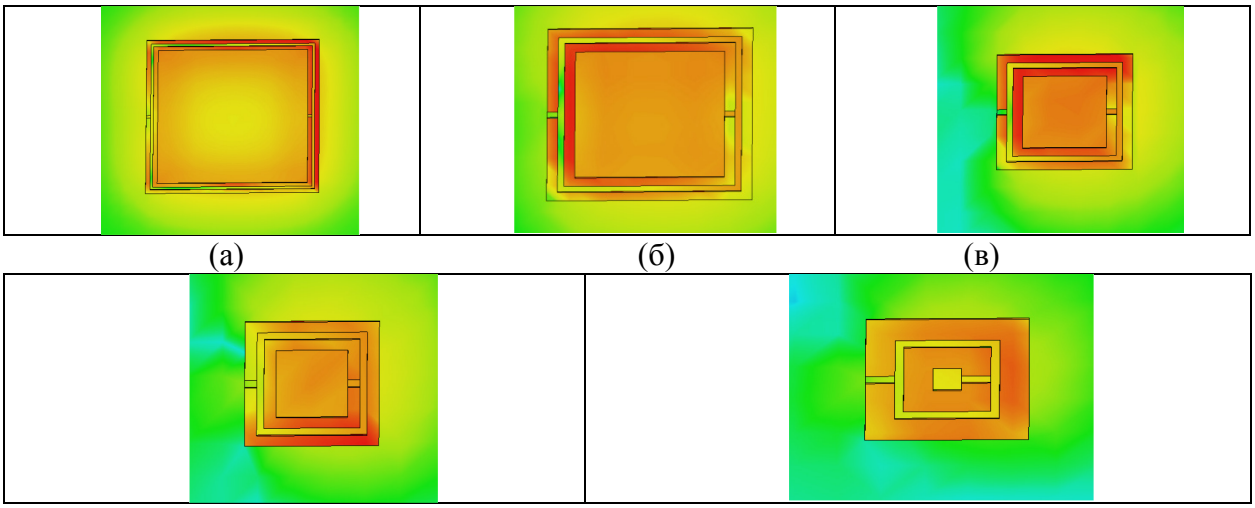


Рис. 12 - График измерения параметра S_{21} для оптимизированного массива резонаторов

Результаты оптимизации представлены на рис. 12. На графике параметра S_{21} мы видим пять резонансов соответствующие каждому из последовательности датчиков. Так же мы заметили, что на высоких частотах наблюдается снижение уровня S_{21}. Скорее всего это связано с потерями мощности из-за излучения последовательных кольцевых резонаторов.

Рассмотрим распределение электромагнитной поля для каждого датчика на соответствующей ему резонансной частоте (рис. 13).

Исследование зависимости изменения коэффициента передачи при исследовании питьевой воды. Материал исследования устанавливается на определенном расстоянии от самого датчика из-за того, что вода является материалом с потерями, особенно если она содержит в себе тяжелые металлы. Выбор правильного расстояния имеет решающее значение. Слишком маленькое расстояние приводит к снижению Q резонаторов и ухудшению чувствительности.



(а) (б) (в)

(г) (д)

Рис. 13 - Распределение электромагнитного поля для каждого резонатора на его резонансной частоте совпадает с площадью датчика:
(а) датчик 1 на частоте 1,78 ГГц, (б) датчик 2 на частоте 4,23 ГГц, (в) датчик 3 на частоте 6,66 ГГц, (г) датчик 4 на частоте 7,83 ГГц и (д) датчик 5 на частоте 8,95 ГГц

С другой стороны, слишком большое расстояние может так же снизить чувствительность отклика на образцы воды (рис. 14).

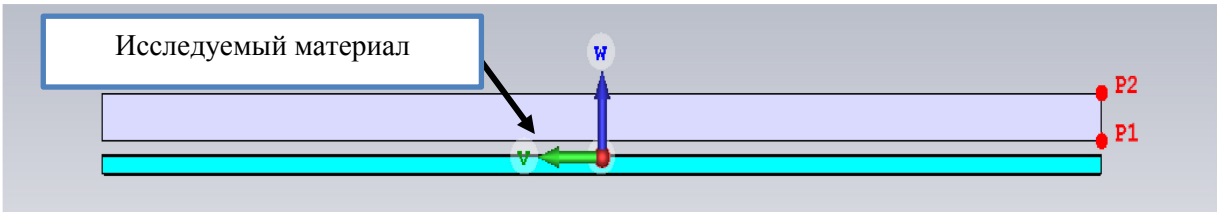


Рис. 14 - Экспериментальная модель для расчета влияния диэлектрической проницаемости воды на коэффициент передачи массива датчиков

После проведенного перинеального испытания мы замерим коэффициент передачи для диэлектрической проницаемости питьевой воды, которая имеет среднее значение 77 Ф/м.

На рис. 15 можно увидеть, что датчик в ходе измерения показал два резонанса в диапазоне от 1 до 4 ГГц, а уже начиная с 4-10 ГГц наблюдается сильное затухание, что говорит о том, что полученный нами датчик имеет чувствительность как на низких, так и на высоких частотах и малейшее изменение диэлектрической проницаемости в этой области будет фиксироваться.

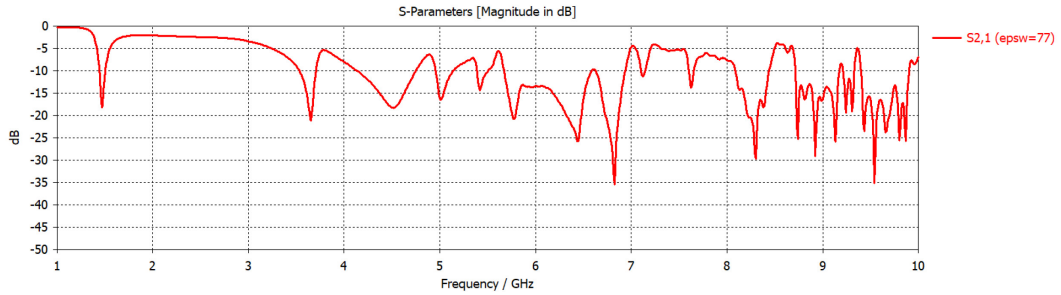


Рис. 15 - Коэффициенты передачи для питьевой воды

Далее проведем измерение растворов питьевой воды.

Для их приготовления были взяты разные вещества в разных пропорциях. В табл. 4 мы указали диэлектрические проницаемости для различных типов водных растворов.

Таблица 4. Диэлектрические проницаемости для различных типов воды

Образцы воды	Содержание веществ	Диэлектрическая проницаемость ε
Образец 1	Чистая питьевая вода	77
Образец 2	NaCl 6440 мг/мл	80
Образец 3	NaCl 40000 мг/мл	69
Образец 4	Аммоний	85
Образец 6	Фосфат	84
Образец 7	Нитрата	86

Исходя из табличных данных, мы провели эксперимент применительно к нашему датчику, подставив значения диэлектрической проницаемости разных типов водных растворов и исследовали изменение коэффициента передач S_{21} показанные на рис. 16.

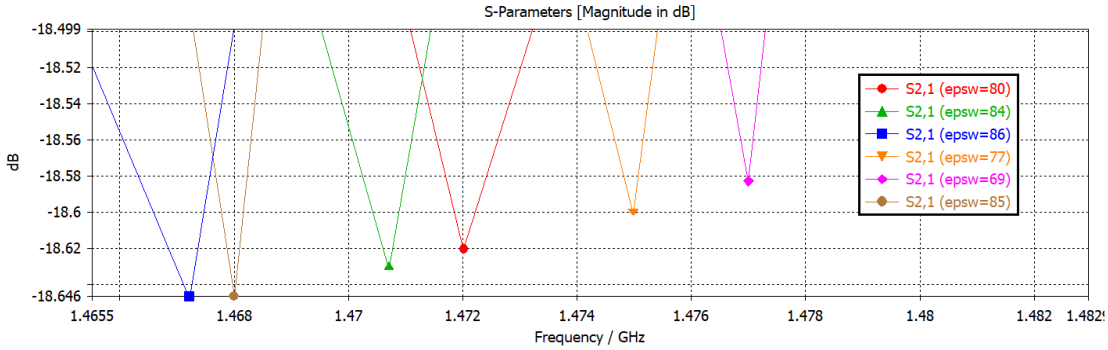


Рис. 16 - Сравнение коэффициента передачи от изменения параметра диэлектрической проницаемости водных растворов.

Заключение. Критерием качества воды является отклонение S_{21} от базового значения питьевой воды для первого резонанса. Для малых диэлектрических проницаемостей существенным будет изменение верхних резонансов. Любое отклонение от данных рис. 15 будет свидетельствовать о содержании в жидкости повышенного значения примесей, которые и говорят о качестве воды. Массив датчиков позволяет нам создать шаблон (вектор чисел), который может быть использован для принятия решений об образце воды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

Список литературы

1. *Ишкаев Т.М. и др.* Применение непланарных микрополосковых СВЧ структур для контроля диэлектрических параметров жидкостей и твердых материалов // Южно-Сибирский научный вестник. 2021. № 6 (40). С. 56-*61*.

2. *Насыбуллин А.Р. и др.* Формирование резонанса Фано в микрополосковой СВЧ структуре // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4 (47). С. 54.

3. *Морозов О.Г., Насыбуллин А.Р.* Свойства сложно-периодических неоднородных систем в радиочастотных и оптических направляющих структурах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18. № 3-1. С. 16-22.

2.3.3.

Р.Р. Константинов, Р.В. Фахрутдинов, Е.А. Мезенцева,
Д.А. Веденькин, В.Ю. Дубровин, А.Р. Насыбуллин, А.А. Силантьева

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ,
кафедра радиофотоники и микроволновых технологий,
Казань, OGMorozov@kai.ru

УПРАВЛЯЕМАЯ БРЭГГОВСКАЯ СТРУКТУРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АНТЕНН РАДИОФОТОННЫХ ЛОКАТОРОВ И ФАЗОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЕНСОРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

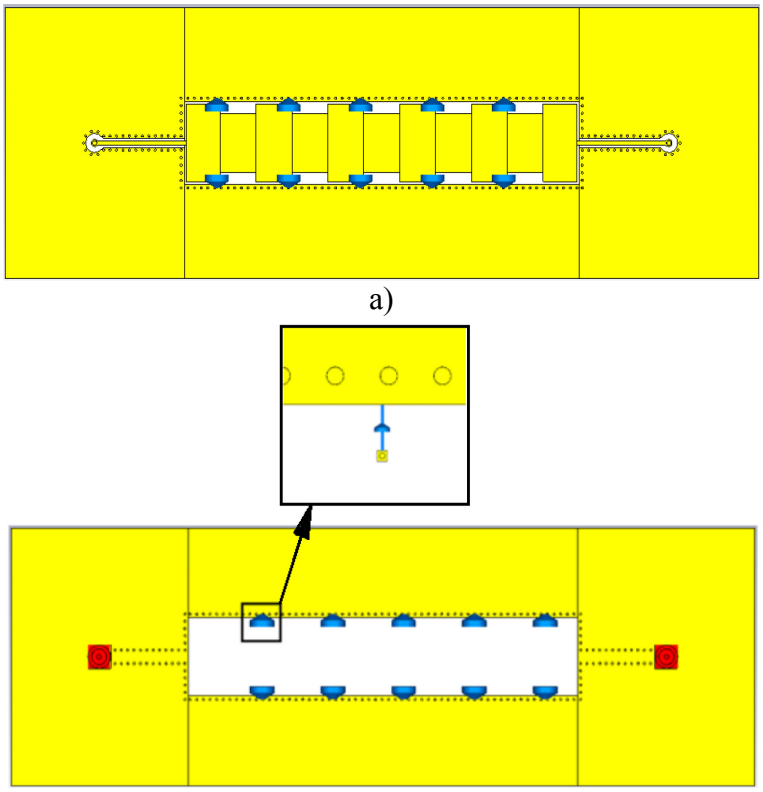
В данной статье спроектирована и промоделирована периодическая брэгговская структура с подключенными сосредоточенными элементами, качестве которых были выбраны варикапы BB857. Для подключения варикапов к периодической брэгговской структуре использованы контактные площадки, рассчитанные для конкретной модели сосредоточенного элемента. Затем, изменяя значение напряжения, приложенного к варикапам, были оценены частотные характеристики, в частности, фаза коэффициента передачи структуры. Полученные законы ее изменения позволили возможности широкого применения такой структуры, в том числе для контроля фазового распределения антенн радиофотонных локаторов и фазовой чувствительности сенсоров диэлектрической проницаемости. Обе эти задачи существенны как для радиофотонной локации, так и для микроволновой сенсорики.

Ключевые слова: *радиофотонная локация; микроволновая сенсорика; периодические брэгговские структуры; управление фазой коэффициента передачи; измерение фазы коэффициента передачи.*

Введение. В данной работе представлен теоретический анализ, этапы проектирования и численное моделирование управляемых СВЧ-структур брэгговского типа, реализованных на основе копланарных линий передачи со встроенными сосредоточенными элементами. В качестве управляемых компонентов используются варикапы, которые позволяют регулировать частотные характеристики при изменении управляющего напряжения.

Актуальность работы обусловлена растущими требованиями к миниатюризации и адаптивности СВЧ-структур, используемых в телекоммуникационных, радиолокационных и измерительных системах. Использование брэгговского резонанса в периодических структурах открывает возможность настройки частотных характеристик путем изменения напряжения, подаваемого на варикапы, что особенно важно при создании гибких и настраиваемых СВЧ-устройств [1-3].

Проектирование образца брэгговской структуры с управлением. Для того, чтобы расположить сосредоточенные элементы для управления брэгговской структуры (рис. 1), варикапы будут располагаться на обратной стороне ее диэлектрической подложки.



а)

б)

Рис. 1 - Периодическая брэгговская структура с подключенными варикапами:
а) вид сверху; б) вид снизу

Для реализации данной модели нужно установить контактные площадки, к которым будет подключаться один из выводов сосредоточенных элементов. Второй вывод будет подключен к земляному слою брэгговской структуры, находящийся также с противоположной стороны диэлектрической подложки. Контактные площадки должны быть размером 0,35х0,35 мм, а расстояние между контактной площадкой и земляным слоем структуры должно быть 1,1 мм.

Результаты моделирования. Далее промоделируем структуру данного вида и оценим как влияет величина приложенного напряжения на частотные характеристики, в частности на коэффициент передачи. Значения напряжений изменялись в диапазоне от 1 до 28 В. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

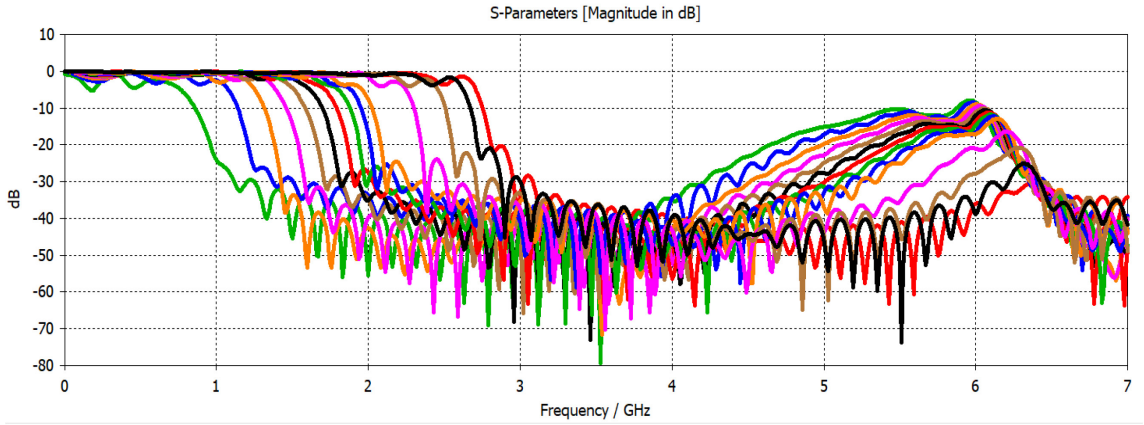
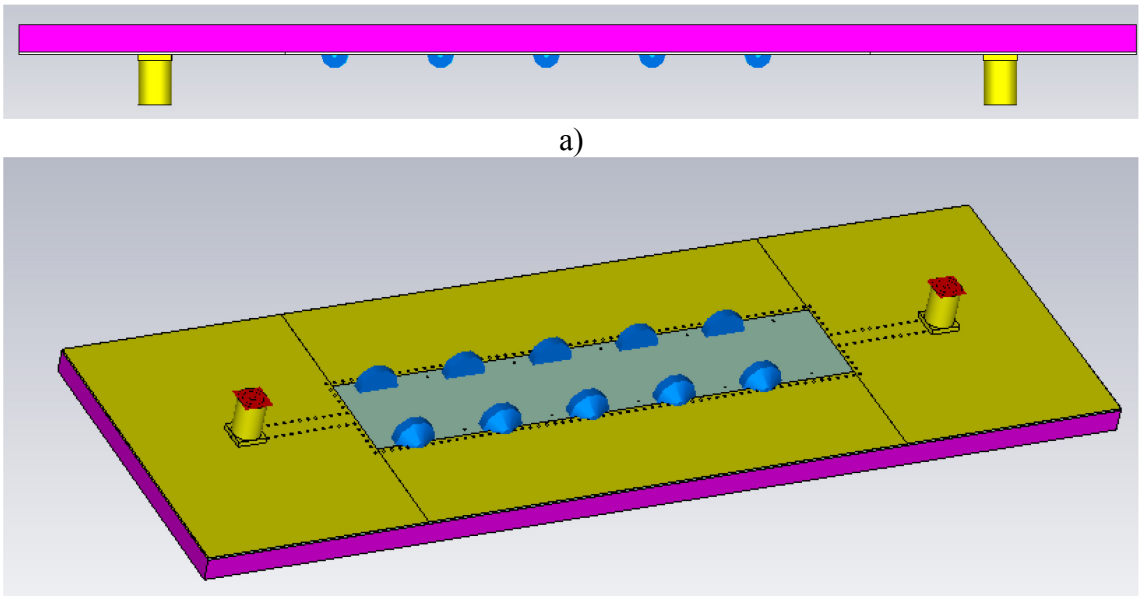


Рис. 2 - Коэффициент передачи периодической брэгговской структуры при различных значениях приложенного напряжения

По представленным графикам коэффициента передачи можно увидеть, что с уменьшением величины приложенного напряжения амплитуда брэгговского резонанса, а также нижняя граница полосы заграждения смещаются вниз по частотной области, что говорит о корректности выполненных расчетов. Далее можно приступать к расположению на

структуре материала, значение диэлектрической проницаемости которого будут изменяться от 2 до 10 для каждого значения приложенного напряжения.

Анализ периодической СВЧ-структуры при различных значениях диэлектрической проницаемости материала. На структуре расположим материал, размеры которого соответствуют периоду структуры, а высота составляет 5 мм. Внешний вид структуры с установленным поверх нее материалом представлен на рис. 3.



а)

б)

Рис. 3 - Управляемая брэгговская структура с исследуемым материалом:
а) вид спереди; б) изометрия

После установки исследуемого материала можно переходить к его моделированию. Для этого оценим влияние величины приложенного напряжения на коэффициент передачи и фазу коэффициента передачи при различных значениях диэлектрической проницаемости исследуемого материала. Значения напряжений изменялись в диапазоне от 2 до 28 В. Значения диэлектрической проницаемости материала составляли 2, 5, 7, 10. Результаты моделирования для значения напряжения $U = 2$ В представлены на рис. 4.

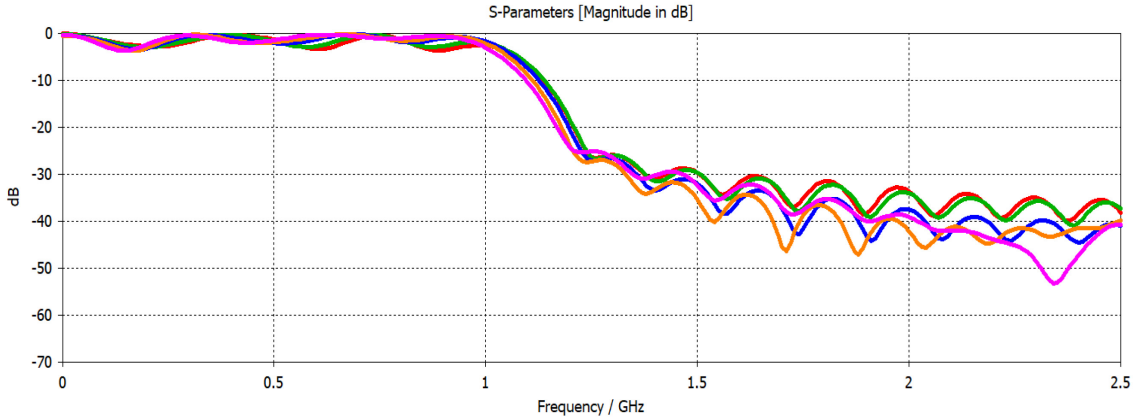


Рис. 4 - Коэффициент передачи управляемой брэгговской структуры с различными значениями диэлектрической проницаемости материала при $U = 2$

По представленным графикам коэффициента передачи можно увидеть, что с уменьшением величины приложенного напряжения амплитуда брэгговского резонанса, а также нижняя граница полосы заграждения смещаются вниз по частотной области. Далее по фазо-частотной характеристике и измерим значение фазы на склоне нижней границы полосы заграждения для каждого значения напряжения, результаты занесем в табл. 1.

Таблица 1 - Значения фазы коэффициента передачи при $U = 2$ В

ε	1	2	5	7	10
φ, град.	124,65	110,36	59,79	25,91	4,73

По значениям из табл. 1 построим зависимость фазы от значения диэлектрической проницаемости материала. Напряжение, приложенное к варикапам, оставалось фиксированным и равным $U = 2$ В. Полученная зависимость представлена на рис. 5.

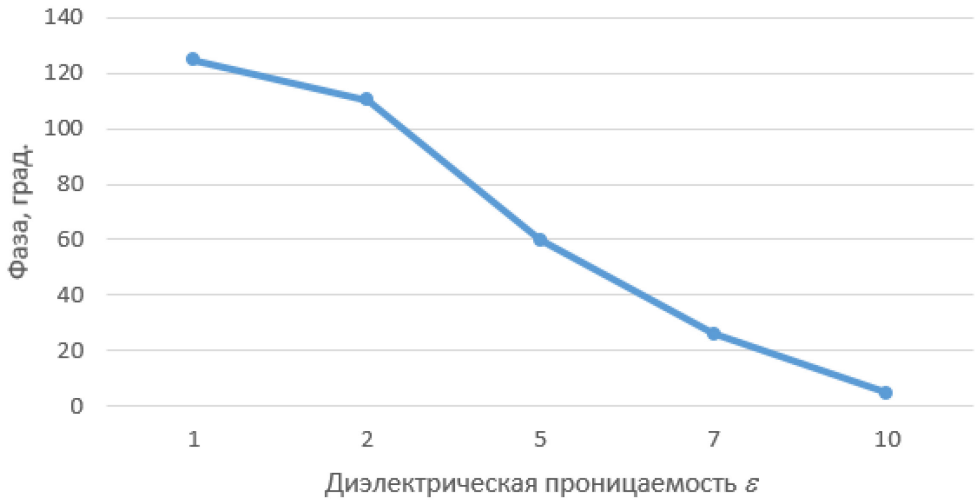


Рис. 5 - Зависимость фазы от диэлектрической проницаемости при $U = 2$ В

По табл. 1 и рис. 5 видно, что при увеличении диэлектрической проницаемости материала, значение фазы коэффициента передачи уменьшается. Также можно сказать, что при изменении диэлектрической проницаемости наибольшую чувствительность имеет участок с 2 до 5, по сравнению с другими участками, так как фаза на этом промежутке изменяется на наибольшее значение.

Теперь проведем аналогичное исследование для следующего значения управляющего напряжения (U = 10 В). Так же, как и для предыдущегозначения, была промоделирована структура при различных значениях диэлектрической проницаемости. Результаты показаны на рис. 6.

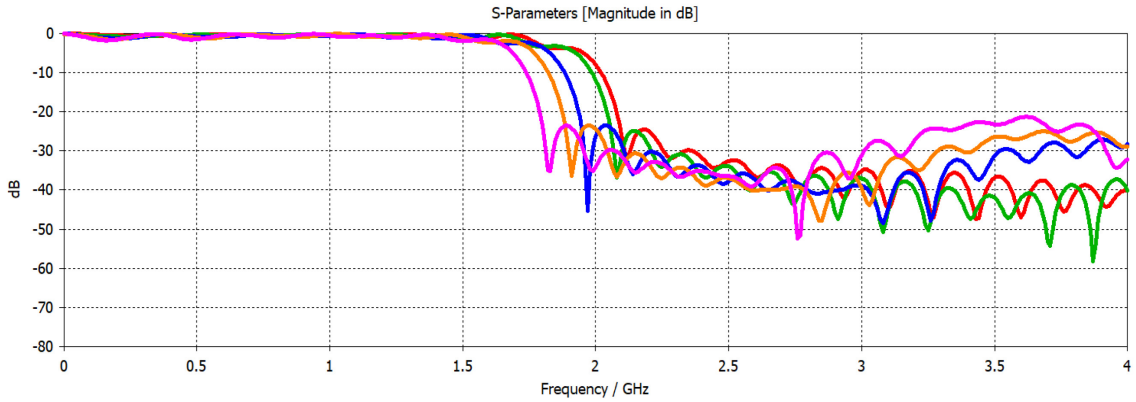


Рис. 6 - Коэффициент передачи управляемой брэгговской структуры с различными значениями диэлектрической проницаемости материала при $U = 10$

По представленным графикам коэффициента передачи можно увидеть, что с уменьшением величины приложенного напряжения амплитуда брэгговского резонанса, а также нижняя граница полосы заграждения смещаются вниз по частотной области. Далее по фазо-частотной характеристике измерим значение фазы на склоне нижней границы полосы заграждения для каждого значения напряжения, результаты занесем в табл. 2.

Таблица 2 - Значения фазы коэффициента передачи при $U = 10$ В

ε	1	2	5	7	10
φ, град.	-41,74	-84,89	-146,4	-187,65	-237,23

По значениям из табл. 2 построим зависимость фазы от значения диэлектрической проницаемости материала. Напряжение, приложенное к варикапам, оставалось фиксированным и равным $U = 10$ В. Полученная зависимость представлена на рис. 7.

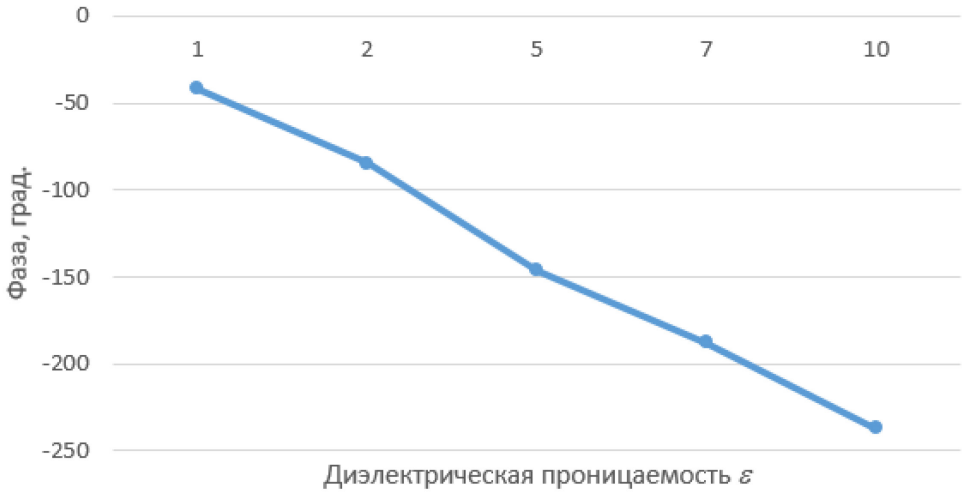


Рис. 7 - Зависимость фазы от диэлектрической проницаемости при $U = 10$ В

По табл. 2 и рис. 7 видно, что при увеличении диэлектрической проницаемости материала, значение фазы коэффициента передачи уменьшается. Также можно сказать, что при изменении диэлектрической проницаемости, как и для предыдущего исследования наибольшую чувствительность имеет участок с 2 до 5, однако другие участки, по сравнению с предыдущим исследованием, имеют примерно равную чувствительность.

Теперь установим значение управляющего напряжения U=18 В. Результаты моделирования представлены на рис. 8.

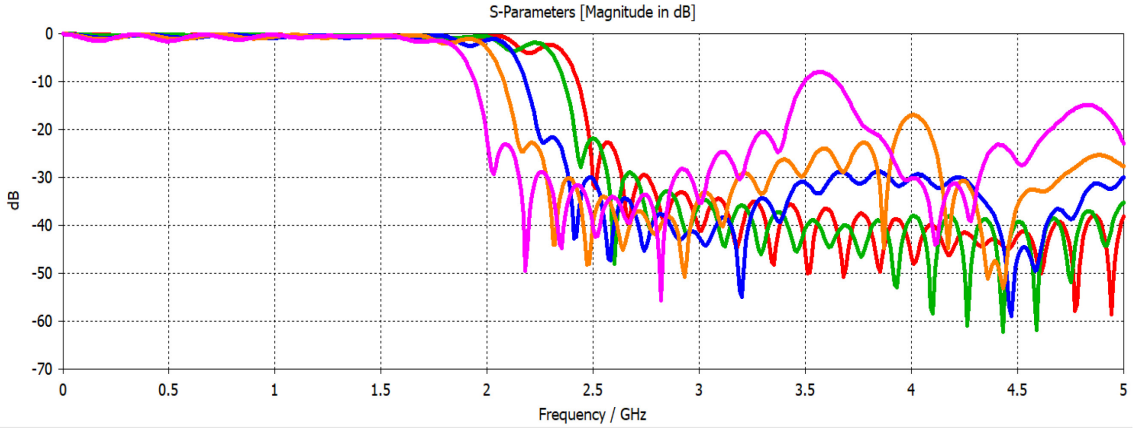


Рис. 8 - Коэффициент передачи управляемой брэгговской структуры с различными значениями диэлектрической проницаемости материала при $U = 18$

По представленным графикам коэффициента передачи можно увидеть, что с уменьшением величины приложенного напряжения амплитуда брэгговского резонанса, а также нижняя граница полосы заграждения смещаются вниз по частотной области. Далее по фазо-частотной характеристике и измерим значение фазы на склоне нижней границы полосы заграждения для каждого значения напряжения, результаты занесем в табл. 3.

Таблица 3 - Значения фазы коэффициента передачи при $U = 18$ В

ε	1	2	5	7	10
φ, град.	-5,56	-23,56	-55,75	-68,47	-70,41

По значениям из табл. 3 построим зависимость фазы от диэлектрической проницаемости материала. Напряжение, приложенное к варикапам, оставалось фиксированным и равным $U = 18$ В. Полученная зависимость представлена на рис. 9.

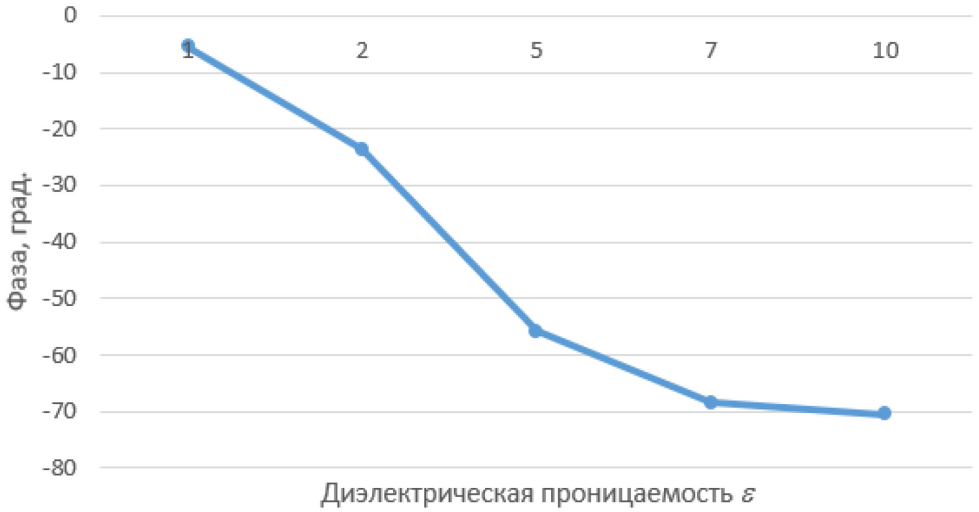


Рис. 9 - Зависимость фазы от диэлектрической проницаемости при $U = 18$ В

По табл. 3 и рис. 9 видно, что при увеличении диэлектрической проницаемости материала, значение фазы коэффициента передачи уменьшается. Также можно сказать, что при изменении диэлектрической проницаемости, так же, как и для предыдущего исследования наибольшую чувствительность имеет участок с 2 до 5, так как фаза на этом промежутке изменяется на наибольшее значение.

Теперь проведем тоже самое исследование для следующего значения управляющего напряжения (U = 28 В). Так же, как и для предыдущих значений, была промоделирована структура при различных значениях диэлектрической проницаемости материала. Результаты показаны на рис. 10.

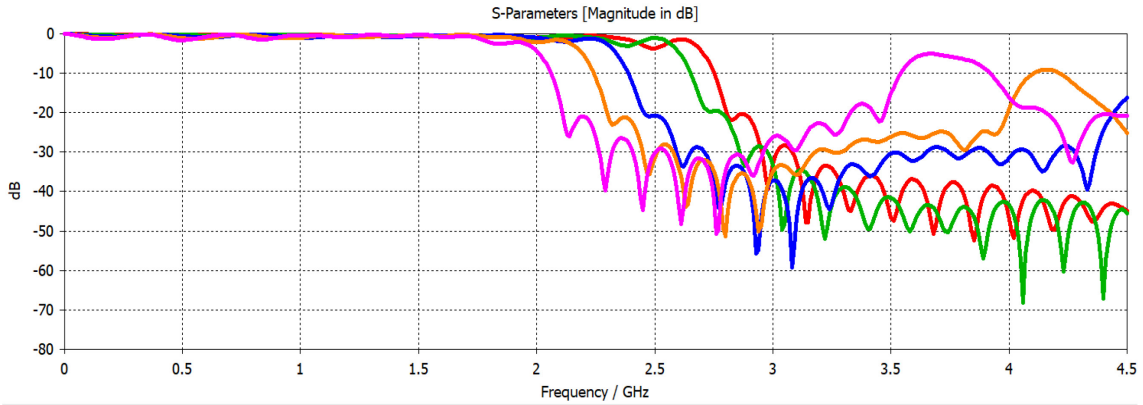


Рис. 10 - Коэффициент передачи управляемой брэгговской структуры с различными значениями диэлектрической проницаемости материала при $U = 28$

По представленным графикам коэффициента передачи можно увидеть, что с уменьшением величины приложенного напряжения амплитуда брэгговского резонанса, а также нижняя граница полосы заграждения смещаются вниз по частотной области. Далее по фазо-частотной характеристике и измерим значение фазы на склоне нижней границы полосы заграждения для каждого значения напряжения, результаты занесем в табл. 4.

Таблица 4 - Значения фазы коэффициента передачи при $U = 28$ В

ε	1	2	5	7	10
φ, град.	-66,14	-79,82	-115,88	-127,32	-138,4

По значениям из табл. 4 построим зависимость фазы от диэлектрической проницаемости материала. Напряжение, приложенное к варикапам, оставалось фиксированным и равным $U = 28$ В. Полученная зависимость представлена на рис. 11.

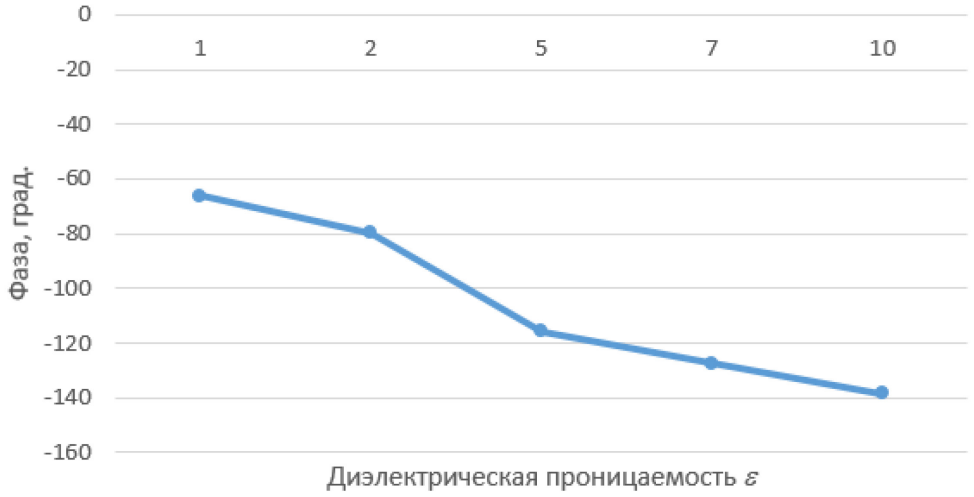


Рис. 11 - Зависимость фазы от диэлектрической проницаемости при $U = 28$ В

По табл. 4 и рис. 11 видно, что при увеличении диэлектрической проницаемости материала, значение фазы коэффициента передачи уменьшается. Также можно сказать, что при изменении диэлектрической проницаемости, так же, как и для предыдущего исследования наибольшую чувствительность имеет участок с 2 до 5, так как фаза на этом промежутке изменяется на наибольшее значение.

Заключение. Таким образом, в данной статье была спроектирована и промоделирована управляемая периодическая брэгговская структура с подключенными сосредоточенными элементами. Исследование полученных характеристик показало, что, варьируя диэлектрической проницаемостью можно управлять фазовым распределением для АФАР радиофотонных локаторов. С другой стороны, получены характеристики зависимости фазы от диэлектрической проницаемости с различной чувствительностью, которые могут быть использованы в различных задачах микроволновой сенсорики.

Еще раз было доказано, что использование управляемого брэгговского резонанса в периодических структурах открывает возможность настройки частотных характеристик путем изменения напряжения, подаваемого на варикапы, что особенно важно при создании гибких и настраиваемых СВЧ-устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

Список литературы

1. *Nasybullin A.R. et al.* MICROWAVE BRAGG STRUCTURES IN A HALF-OPEN COAXIAL LINE // Questions of Radio Electronics. 2021. Т. 1. № 1. С. 4-12.
2. *Фархутдинов Р.В. и др.* Брэгговская СВЧ-структура в коаксиальном волноводе как датчик контроля диэлектрических параметров жидких сред // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22. № 4-2. С. 114-120.
3. *Насыбуллин А.Р. и др.* Брэгговские сенсорные СВЧ-структуры на коаксиальном кабеле // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 3. С. 8.

2.3.3.

В.И. Курир

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева − КАИ,
институт автоматики и электронного приборостроения,
кафедра электрооборудования,
Казань, kurir_valerian@mail.ru

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Тенденции развития электроэнергетических систем (ЭЭС), тесно связанные с общим экономическим развитием, характеризуются устойчивым ростом электрических нагрузок и соответствующим увеличением генерирующих мощностей, усилением связей с соседними ЭЭС и созданием крупных объединенных систем. Неизбежным следствием такого развития является рост токов короткого замыкания, особенно остро проявляющийся в регионах с высокой плотностью энергопотребления, а также мегаполисах и необходимость создания новых высоковольтных быстродействующих токоограничивающих устройств.

Ключевые слова: *токоограничивающие устройства высоковольтной электроэнергетики, сверхпроводниковые устройства в энергетике.*

В статье приведены направления создания токоограничивающих устройств применительно к высоковольтным системам электроэнергетики.

В настоящее время в отечественных энергосистемах для ограничения токов КЗ наиболее часто используются: стационарное и автоматическое деления сети, токоограничивающие реакторы и аппараты, трансформаторы с расщепленной обмоткой низшего напряжения, а также разземление нейтралей части силовых трансформаторов сети, их заземление через реакторы и резисторы. Таким образом, ограничение токов КЗ достигается увеличением реактивного сопротивления сети, что приводит к увеличению потерь в сети, снижению качества напряжения на шинах и, в конечном итоге, надежности электроснабжения потребителей.

Новое направление по применению электроэнергетике управляемых токоограничивающих устройств (ТОУ), связано со значительным прогрессом в развитии импульсных технологий и появлением мощных коммутационных аппаратов на базе разрядников вакуумных управляемых (РВУ), применением ТОУ на базе сверхпроводниковых материалов.

Перспективы использования РВУ обусловлены такими их преимуществами по сравнению с другими типами коммутирующих устройств, как способности практически не оказывать влияние на нормальные режимы объекта; быстро снижать ТКЗ и ПВН; работать в широком диапазоне напряжений и токов; иметь сравнительно низкую стоимость по сравнению газоразрядными и полупроводниковыми приборами, а также небольшие габариты по сравнению с известными ТОУ.

В качестве одного из перспективных вариантов ТОУ ОАО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» совместно с ФГУП «ВЭИ» в рамках инновационной программы ОАО «ФСК ЕЭС» выполнил разработку «Системы ограничения токов КЗ и переходных восстанавливающихся напряжений в сетях 110−220 кВ на основе вакуумных управляемых разрядников» (СОТ−РВУ) [1].

В такой системе необходимый набор РВУ подключается к шинам, у присоединений которых требуется ограничение ТКЗ. Сущность функционирования СОТ−РВУ заключается в том, что если при КЗ на присоединении зафиксирован «опасный» ток, пусковое устройство осуществляет быстрое включение (единицы мкс) РВУ, в результате чего происходит

перераспределение ТКЗ между местом КЗ и местом включения РВУ и снижение уровня ПВН на выключателе, т.е. обеспечиваются условия для отключения тока выключателем. После отключения выключателей присоединения разрядники должны отключаться и таким образом осуществляется полный цикл отключения КЗ.

Благодаря тому, что время поджига разрядников (время пробоя разрядника и время срабатывания блока поджига) не превышает 1 мс, появляется возможность по ограничению динамического воздействия ударного ТКЗ на оборудование присоединения. Для этого токовый пусковой орган (ТПО) должен выявить амплитуду принужденной периодической составляющей первичного опасного ТКЗ и сформировать команду на управление разрядниками (поджиг РВУ) за время не более, чем за 2−3 мс.

Результаты математического моделирования токов КЗ в представленной системе выключатель – ВБК представлены на рис. 1.

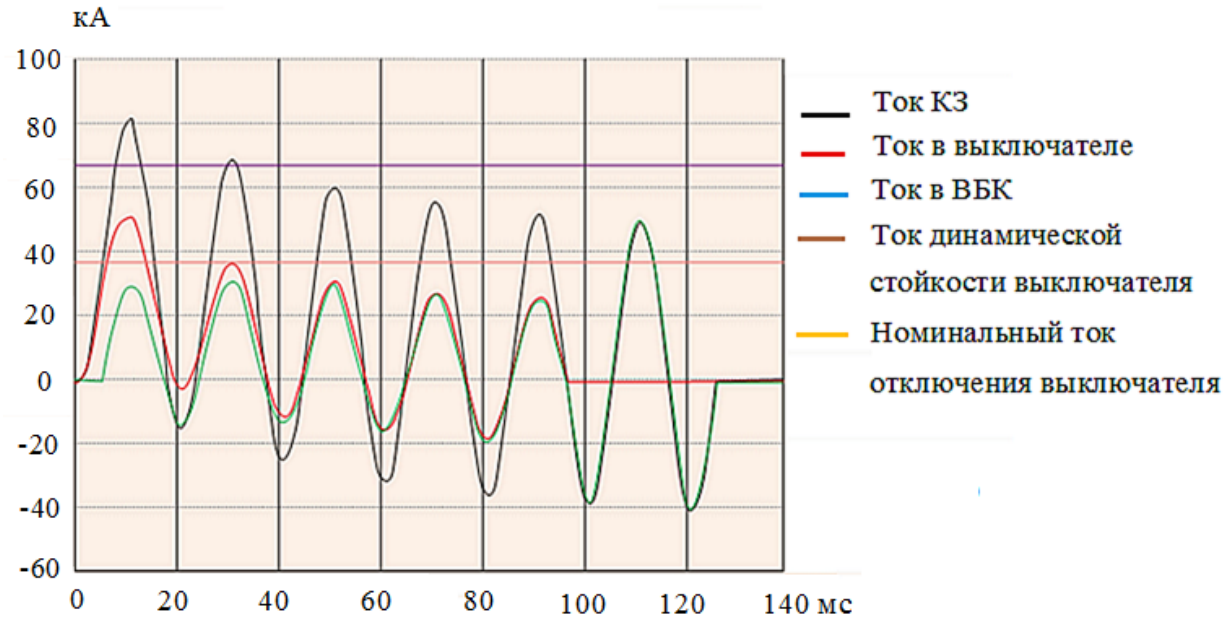


Рис. 1 - Результаты моделирования распределения токов КЗ для ПС 220 кВ «Радищево»

Шатурским филиалом Объединенного института высоких температур была разработана схема токоограничивающего устройства, представленная на рис. 2, состоящего из: высоковольтного коммутатора взрывного типа с двумя системами управления; безындукционного резистора; плавких коммутаторов в цепи резистора; специального реактора.

Примером коммутационных ограничителей тока КЗ могут служить коммутационные ограничители тока КЗ типа CLiP производства фирмы G&W Electric Co. (США) [3] и Is−Limiter производства фирмы ABB (Швейцария) [4].

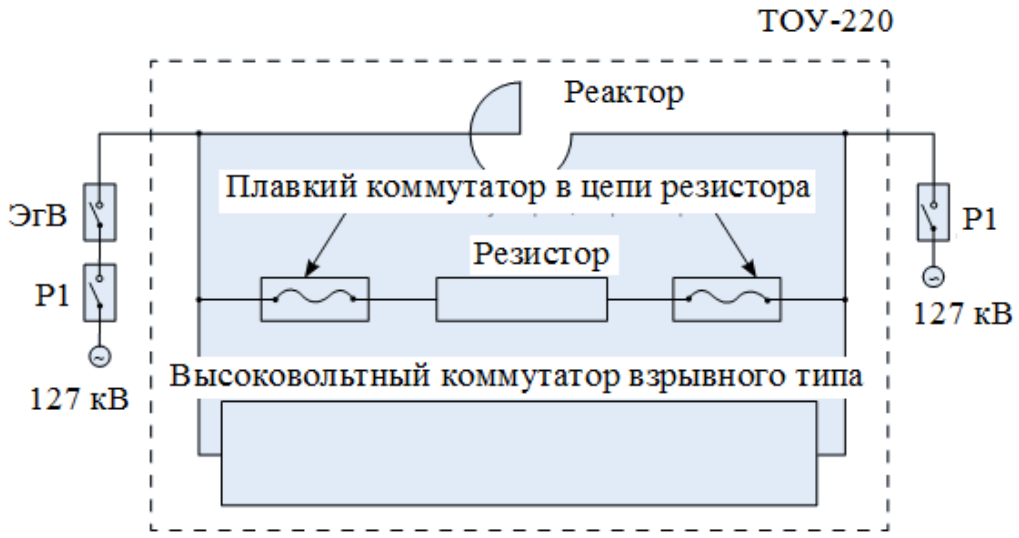


Рис. 2 - Функциональная схема токоограничивающего устройства на основе высоковольтных коммутаторов взрывного типа

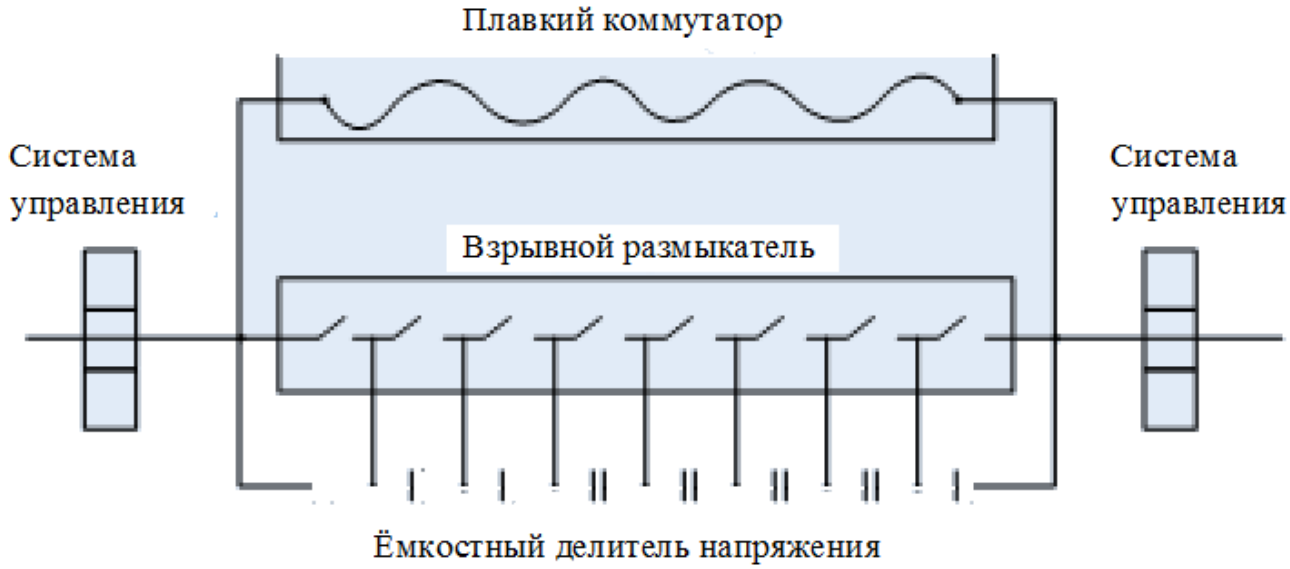


Рис. 3 - Принцип построения высоковольтного коммутатора взрывного типа

В состав коммутатора взрывного типа введен плавкий коммутатор (см. рис. 3). Он представляет собой токоограничивающий предохранитель с проводником, выполненным из алюминиевой ленты и располагаемой в кварцевом песке определенной фракции. Интеграл действия выбирается из условия, что отключение тока в плавком коммутаторе начинается не ранее, чем взрывной коммутатор достигнет заданного уровня восстанавливающего напряжения (электрической прочности). Профилированием ленты достигается ее плавный переход в плазменное состояние с последующим отключением тока.

Для изготовления безындукционного резистора должен быть применен провод из материалов с относительно низкой проводимостью (нержавеющая сталь, нихром, фехраль и пр.) с высокотемпературной изоляцией (не менее 180 °С) требуемой электрической прочности. Количество слоев, материал, вес и иные характеристики выбираются из параметров сети и условий работы ТОУ.

Аналогом для проектирования специального реактора приняты токоограничивающие реакторы, входящие в сеть 110 кВ, при условии, что индуктивное сопротивление реактора не превосходит 4 Ом.

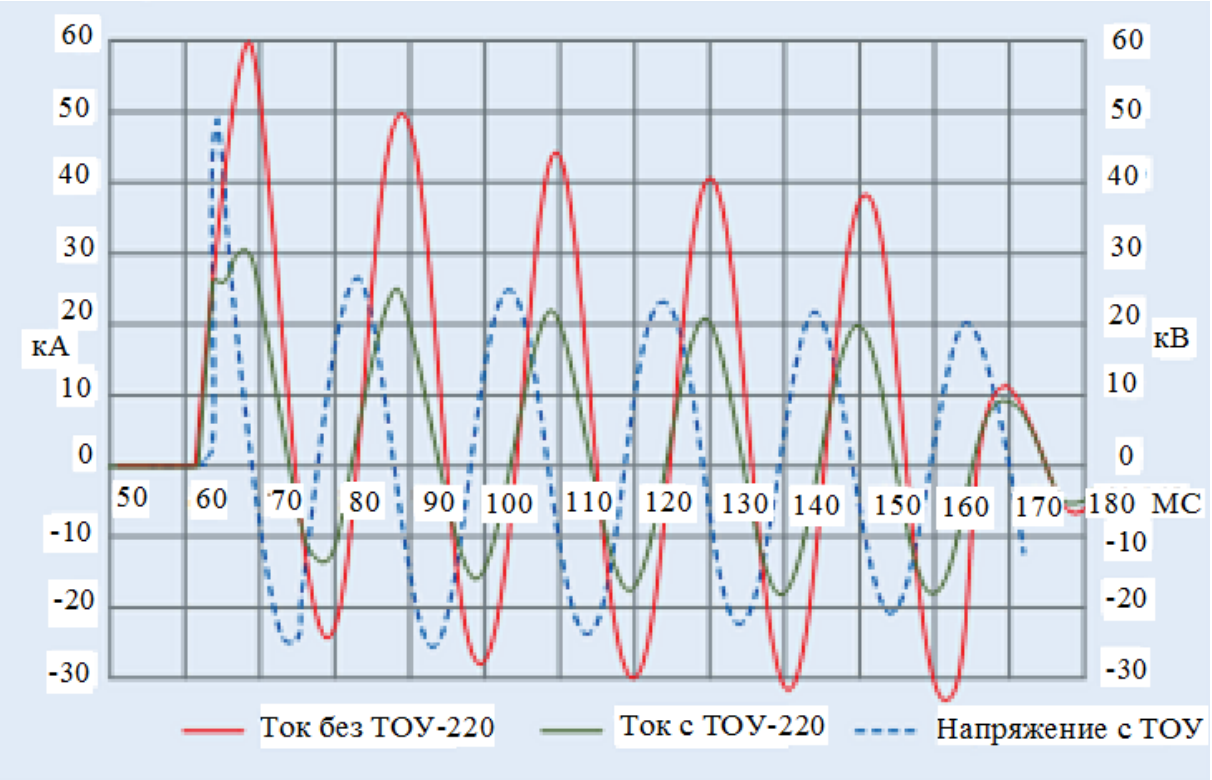


Рис. 4 - Функционал работы ТОУ−220 (осциллограммы токов и напряжений)

Токоограничивающее устройство реализовано на напряжение 220 кВ для ПС 500 кВ «Каскадная» МЭС Центра.

Применение токоограничителей наиболее эффективно:

− на связи двух систем (в разрез двух систем шин среднего напряжения), что дает снижение мощности КЗ всей системы, снижение сопротивления сети, не отключает трансформаторы при срабатывании ОТКЗ (ограничителей тока КЗ) от питаемых линий;

на питающих шины СН линиях (последовательно с трансформаторами и генераторами, работающими на эти шипы);

− на отходящих линиях СН (последовательно с каждой нагрузкой), что кроме вышеуказанных преимуществ, защищает каждую отходящую линию. Главные шины рассчитаны на полный ток КЗ. Пример размещения ОТКЗ в энергосистеме показан на рис. 5.

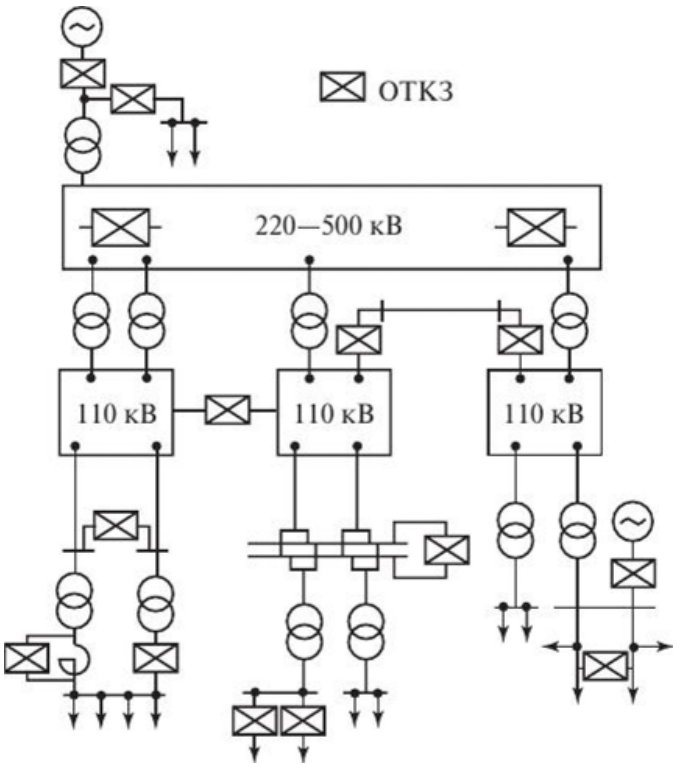


Рис. 5 - Возможные места размещения ОТКЗ в энергосистеме

Ранние разработки новых типов высоковольтных токоограничителей, как, впрочем, и другого оборудования, основывались на применении низкотемпературных сверхпроводников (НТСП). Пожалуй, самым удачным можно назвать совместный проект французской электроэнергетической системы Electricite de France и концерна Alstom – созданный НТСП-токоограничитель выдержал испытания на 40 кВ [5].

Открытие в 1986 году высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) кардинально изменило положение, ведь теперь сверхпроводящего состояния можно достичь охлаждением не до 4 °К (как у НТСП), а до 77 °К, и, конечно, не жидким гелием, а азотом, что существенно удешевляет конструкцию ВТСП-токоограничителя и уменьшает его габариты. Его основная функция заключается в практически мгновенное ограничение тока короткого замыкания и снижение при этом нагрузки на другие элементы системы.

Принцип действия достаточно прост. ВТСП − это сверхпроводниковая лента, способная сохранять свои свойства при температуре переохлажденного жидкого азота (−201 градус °С). Такую температуру поддерживает система криогенного охлаждения, состоящая из трех охладителей. Для этого используют газообразный неон (−205 градусов °С), который подается по теплообменнику. При коротком замыкании ВТСП ТОУ переходит в режим токоограничения за 0,003 секунды [6]. Сопротивление резко возрастает, что приводит к снижению уровня тока короткого замыкания. После того как проблема решена, в течение 30 секунд сопротивление устройства падает до нуля и оно возвращается в режим сверхпроводника.

Авторы [7] в качестве ТОУ используют ВТСП-провод второго поколения на основе иттриевой керамики, который имеет слоистую структуру и его сверхпроводящий слой занимает малую долю. В нагрузочном режиме ВТСП-провод обладает нулевым сопротивлением, а при возникновении сверхтоков сверхпроводящий слой переходит в нормальное состояние, в котором обладает большим сопротивлением. Ток, протекающий по проводу, вытесняется в несверхпроводящие слои (в основном медные слои), которые, в свою очередь, могут значительно ограничивать ток по причине относительно малого поперечного сечения. На основе этого созданы высокотемпературные сверхпроводящие токоограничивающие устройства (ТОУ) резистивного типа.

Первый российский сверхпроводниковый ограничитель тока внедрен российской научно-исследовательской фирмой СуперОкс на подстанции АО «ОЭК» «Мневники», включение

под напряжение было проведено в декабре 2018 года (см. рис. 6). Министерством энергетики РФ проекту присвоен статус национального [8, 9]. Основная функция устройства − практически мгновенное ограничение тока короткого замыкания и снижение при этом нагрузки на другие элементы системы. ВТСП ТОУ снижает ток короткого замыкания в 5–10 раз и радикально уменьшает требования к стойкости всего оборудования энергосистемы в аварийных режимах».

Рис. 6 - СПВТ, установленный на подстанции АО «ОЭК» «Мневники» г. Москва

Использование токоограничивающих устройств на основе элементов силовой электроники (высоковольтные тиристоры GTO, IGBT-транзисторы) в энергетических сетях среднего и низкого напряжения, представлено в работах [10 – 12].

В работе [13] отмечена необходимость учёта влияния устройств FACTS (основные элементы интеллектуальных сетей SMART GRID) на токи короткого замыкания (КЗ) в электрических сетях. Приведены результаты исследования влияния основных устройств FACTS: статического тиристорного компенсатора (СТК), статического компенсатора (СТАТКОМ), объединённого регулятора потоков мощности (ОРПМ), синхронного статического продольного компенсатора (ССПК), тиристорно-управляемого устройства продольной компенсации (ТУПК), управляемого шунтирующего реактора (УШР). Исследования показали, что степень влияния различных устройств FACTS на токи КЗ зависит от их назначения, структурных особенностей, мощности, места подключения в схеме электрической сети и вида КЗ. Наибольшее влияние на токи КЗ оказывают СТК и СТАТКОМ, в меньшей степени - ОРПМ, ТУПК, УШР, что указывает на необходимость учёта данных устройств при расчётах токов КЗ.

Список литературы

1. *Аникин А.А., Воронин В.А., Иванов В.А., Косолапов А.М. и др.* Ограничение токов короткого замыкания в сетях 110–220 кВ на 1. базе вакуумных управляемых разрядников // Энергия единой сети. – 2013. – № 6(11). – С. 64 − 69.

2. *Шурупов А.В., Козлов А.В., Фортов В.Е., Бердников Р.Н., Шакарян Ю.Г., Сон Э.Е.* Токоограничители на основе быстродействующих коммутаторов. Опыт создания токоограничивающего устройства на напряжение 220 кВ // Энергия единой сети. – 2013. − № 2(7). – С. 54 – 65.

3. Токоограничивающие устройства CLiP компании G&W Electric Co. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.gwelectric.com/pro- duct/clip/ (Дата обращения 20.06.2025).

4. Ограничители тока для снижения высоких токов короткого замыкания компании ABB. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.enwl.co.uk/globalassets/innovation/fcam/ fault-current-active-management-appendix-1.pdf (Дата обращения 20.06.2025).

5. *Юренков Ю.П.* Совершенствование ограничителей тока на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей в системах электроснабжения до 1 кВ: дис.канд. техн. наук. – Ульяновск, 2022. – С. 31

6. *Медовников Д., Механик А.* Стратегия высокой температуры. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://stimul.online/articles/ kompaniya/strategiya-vysokoy-temperatury/?ysclid=mbrkhlros5516303103 (Дата обращения 20.06.2025).

7. *Александров Н.В., Шевцов Д.Е., Ядагаев Э.Г., Дашеев Д.Е.* Влияние высокотемпературных сверхпроводящих токоограничивающих устройств резистивного типа устойчивость электроэнергетических систем // Электротехнические системы и комплексы. − 2023. − № 4(61). – С. 38 – 45.

8. Мойзых М.Е., Самойленков С.В., Вавилов А.П., Прохоров Е.С., Пучков А.С. и др. Первое в энергосистеме России токоограничивающее устройство на основе высокотемпературной сверхпроводимости // Электричество. – 2021. − № 4. – С. 4 – 16.

9. *Moyzykh M., Gorbunova D., Ustyuzhanin P., Sotnikov D., et al.* First Russian 220 kV Superconducting Fault Current Limiter (SFCL) For Application in City Grid // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2021. − V. 31. − No. 5. – 10 p. − [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://scispace.com/ pdf/first-russian-220-kv-superconducting-fault-current-limiter-2nsu5taahc.pdf (Дата обращения 20.06.2025).

10. *Kunde K.* Integration of fast acting Electronic Fault Current Limiters (EFCL) in medium−Voltage systems // In 17th International Conference on Electricity Distribution. Spain, Barcelona, 12−15 May 2003, 7 p. − [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/228924287_ Integration_of_fast_acting_ Electronic_Fault_Current_Limiters_EFCL_in_medium-Voltage_systems (Дата обращения 20.06.2025).

11. *Alam M.S., Abido M.A.Y., and El-Amin I.* Fault Current Limiters in Power Systems: A Comprehensive Review // Energies. – 2018. – V.11. – N. 5. – 1025. −24 p. − [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sci-hub.ru/10. 3390/en11051025 (Дата обращения 20.06.2025).

12. *Majeed W.S., Nasser A.I., Al−Bahrani L.T.* A Comprehensive Review for Application of Fault Current Limiters in Power Systems // Al-Iraqia Journal for Scientific Engineering Research. – 2023. – V. 2. – N. 2. – P. 45 – 57. − [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ijser.aliraqia.edu.iq/ index.php/ijser/article/view/70/53 (Дата обращения 20.06.2025).

13. *Жуков В.В., Русаков В.Ю.* Исследование влияния устройств FACTS на токи короткого замыкания в энергосистемах // Энергетик. – 2018. − № 1. – С. 23 – 28.

2.3.3.

[1]Р.Р. Нигматуллин, [1]А.Р. Насыбуллин, [1]Ю.Е. Седельников, [1]Р.В. Фархутдинов, [1]О.В. Никишина, [2]С.Г. Алюшина, [1]В.И. Баязитова

[1]Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, кафедра радиофотоники и микроволновых технологий, Казань, [2]МФЮУ МФЮА, Москва, OGMorozov@kai.ru

МИКРОПОЛОСКОВЫЙ СВЧ-КОМПАРАТОР НА РЕЗОНАНСЕ ФАНО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОРОШКОВ

Формирование резонанса Фано в микрополосковой структуре СВЧ-компаратора позволяет значительно повысить точность и чувствительность измерений диэлектрической проницаемости порошковых материалов. Резонансный отклик, обладающий характерной асимметрией, предоставляет уникальную возможность регистрации малейших изменений диэлектрических свойств, связанных с плотностью уплотнения материала. В совокупности с функцией компаратора, предложенный подход обеспечивает воспроизводимую и точную методику для калибровки и автоматизированной оценки качества порошков в различных производственных и исследовательских условиях. В данной статье рассматривается один из вариантов такого компаратора для исследования зависимости изменения диэлектрической проницаемости порошковых материалов от их плотности.

Ключевые слова: *микроволновая сенсорика; СВЧ-компаратор; резонанс Фано; диэлектрическая проницаемость; порошковый материал; плотность.*

Основы метода. Балансировка. В данном разделе статьи представлено исследование влияния плотности материала на его диэлектрическую проницаемость. С целью приближения условий к реальному эксперименту [1-3], после настройки и оптимизации параметров работы датчика производилось варьирование толщины образца, что эквивалентно изменению плотности порошковой среды в измерительной камере. Одновременно проводились измерения при различных значениях диэлектрической проницаемости исследуемых веществ.

На рис. 1 представлена сбалансированная конфигурация СВЧ-компаратора с исследуемыми образцами материала [4].

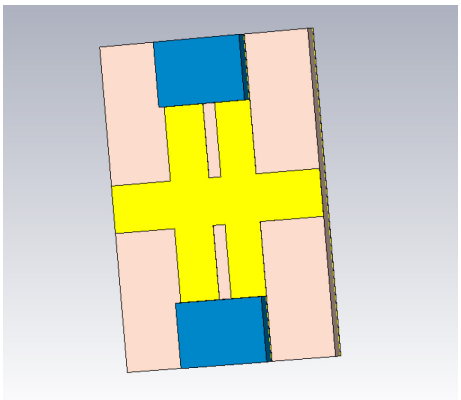


Рис. 1 - 3D-вид резонатора при сбалансированном режиме работы

В схеме реализовано симметричное нагружение: на верхнюю и нижнюю двухшлейфные структуры помещены идентичные образцы порошка кварца SiO_2 с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2{,}3$, тангенсом угла диэлектрических потерь $\mathrm{tg}\delta = 0{,}0004$ и объемной плотностью $\rho = 0{,}8$ г/см³.

При такой ситуации формируется ярко выраженный резонанс Фано, который показан на рис. 2.

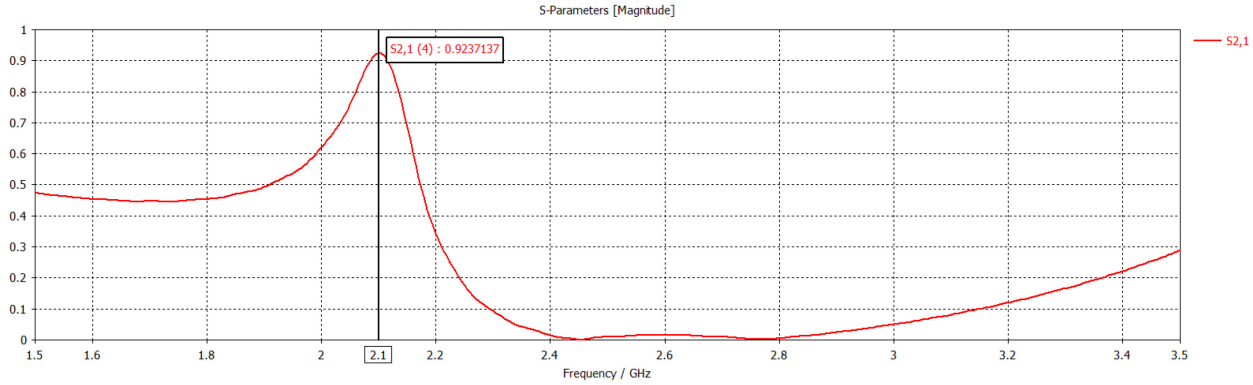


Рис. 2 - Коэффициент передачи S21 для четырехшлейфного резонатора в сбалансированном режиме

Отметим, что график коэффициента передачи S21 имеет резонансный пик на частоте 2,1 ГГц.

Несбалансированный режим. Несбалансированный режим работы резонатора достигается заменой одного из образцов на порошок кварца с другими параметрами: объемной плотностью ρ = 2,2 г/см³, диэлектрической проницаемостью ε = 4,2 и tgδ = 0,0012 (рис. 3).

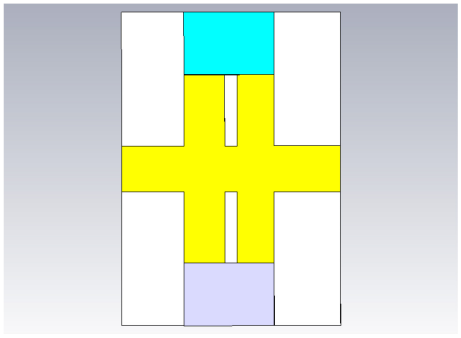


Рис. 3 - 3D – вид резонатора при несбалансированном режиме работы

На графике, изображённом на рис. 4, наблюдается выраженный дифференциальный пик Фано на частоте 2,29 ГГц.

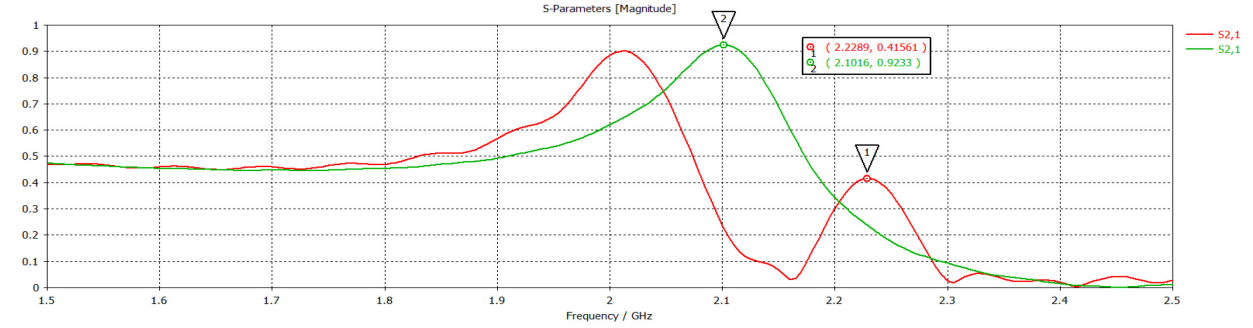


Рис. 4 - Коэффициент передачи S21 для четырехшлейфного резонатора, работающего в несбалансированном режиме

Эти результаты подтверждают корректность работы, созданной СВЧ-структуры и позволяют перейти к следующему этапу – моделированию изменения плотности исследуемых образцов в электродинамической программе.

Исследование зависимости диэлектрической проницаемости от плотности. Для оценки чувствительности датчика проведена серия параметрических моделирований, в рамках которых варьировалась разность значений диэлектрической проницаемости исследуемых образцов.

Параметры первого образца будут постоянны: диэлектрическая проницаемость ε = 2.3 и тангенсом угла потерь tgδ = 0,0002 при объемной плотности ρ = 0,8 г/см^3. У второго образца

диэлектрическая проницаемость изменялась в диапазоне от 2,3 до 20.

На рис. 5 и 6 приведено семейство частотных характеристик коэффициента передачи S21, полученных в результате электродинамического моделирования при различных значениях Δε.

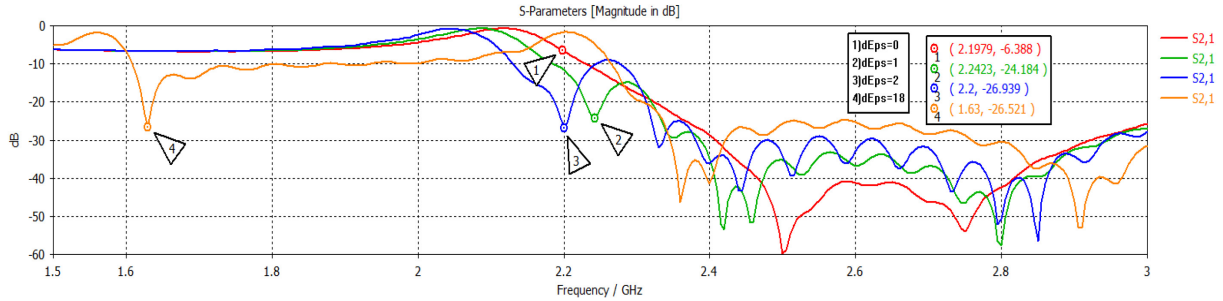


Рис. 5 - Семейство графиков коэффициента передачи S21 для:
1) сбалансированный режим; 2) Δε=1; 3) Δε=2; 4) Δε=18

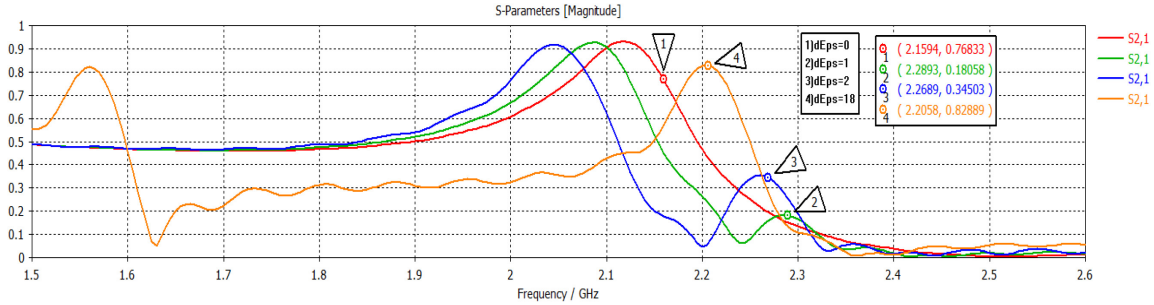


Рис. 6 - Семейство графиков коэффициента передачи S21 в линейном формате для:
1) сбалансированный режим; 2) Δε=1; 3) Δε=2; 4) Δε=18

Анализ результатов показывает, что с увеличением разности диэлектрических проницаемостей сравниваемых образцов наблюдается сдвиг резонансной частоты в сторону понижения, а также изменение формы резонансного отклика. При Δε < 2 форма отклика практически не искажается, что указывает на предел чувствительности рассматриваемой конструкции.

На рис. 7 приведены частотные характеристики коэффициента передачи S21 для различных значений объемной плотности другого материала – магнетита. Красная кривая (1) соответствует сбалансированному режиму, а зелёная (2), синяя (3) и оранжевая (4) — несбалансированным режимам с плотностью 2,0; 2,5 и 3,0 г/см³ соответственно.

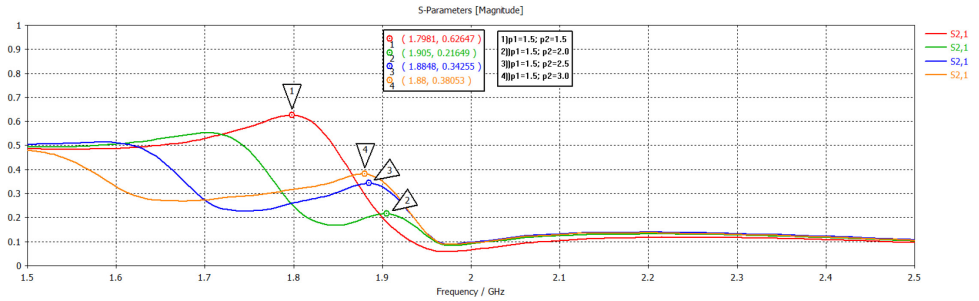


Рис. 7 – Семейство графиков коэффициента передачи *S*21 для четырехшлейфного резонатора, работающего в несбалансированном режиме, по магнетиту

Анализ результатов моделирования показывает, что с увеличением плотности исследуемого материала, а, следовательно, и его диэлектрической проницаемости, происходит смещение резонансного пика Фано в сторону более низких частот и увеличение его амплитуды. Особенно ярко это проявляется при сравнении результатов для плотностей 2,0 и 3,0 г/см³: амплитуда пика возрастает с 0,21 до 0,63, что демонстрирует чувствительность резонатора к изменениям свойств исследуемого порошкового материала.

Заключение. Проведённый анализ показал, что четырёхшлейфный микрополосковый СВЧ-компаратор демонстрирует высокую чувствительность к изменению диэлектрических свойств исследуемого материала, вызванных варьированием его объемной плотности. На

примере порошка магнетита Fe_3O_4 было показано, что увеличение плотности материала приводит к смещению резонансной частоты в сторону понижения, а также к значительному возрастанию амплитуды резонансного пика Фано. Полученные результаты подтверждают применимость разработанного компаратора для дифференциального анализа порошковых сред, чувствительного к малым изменениям их электрофизических параметров.

Таким образом, разработанная СВЧ-структура обладает потенциалом в качестве сенсора для оценки диэлектрической проницаемости и, как следствие, плотности порошкообразных материалов, что открывает перспективы для её использования в метрологических задачах и мониторинге технологических процессов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

Список литературы

1. *Морозов О.Г. и др.* Двухчастотный метод определения параметров резонансных датчиков СВЧ-диапазона // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 1 (20). С. 76-86.
2. *Морозов Г.А. и др.* Функционально адаптивные СВЧ-технологии в задачах переработки термопластичных полимерных материалов // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2011. № 3 (13). С. 13-24.
3. *Морозов Г.А. и др.* Микроволновая обработка термореактивных и термопластичных полимеров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 3. С. 114-121.
4. *Amin M. et al.* A highly sensitive biosensing method using differential detection of Fano resonance lineshape // Journal of Lightwave Technology. 2024. Vol. 42. P. 19-28.

2.3.3.

[1]Д.А. Сайфутдинов, [1]А.З. Петрова, [1]Г.А. Морозов, [1]Д. Даххам,
[1]О.Г. Морозов, [2]С.В. Смирнов, [2]М.И. Гараев

[1]Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, кафедра радиофотоники и микроволновых технологий,
[2]Казанский юридический институт МВД РФ,
кафедра экономики, финансового права и информационных технологий
в деятельности ОВД;
Казань,OGMorozov@kai.ru

АНАЛИЗ ПОТЕРИ ВЕСА КАК КРИТЕРИЙ КОНТРОЛЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СВЧ НАГРЕВА ЦЕЛЫХ ШИШЕК

Микроволновая камера, несмотря на простоту конструкции, является достаточно сложным устройством для автоматизации. Для лучшего взаимодействия нагретого объекта с СВЧ-поля, в СВЧ-камере конструктивно стараются добиться большего количества максимумов высших мод. Однако в современных программных продуктах электродинамического моделирования не реально получить результаты, близкие к практическим. Это позволяет оптимизировать дизайн камеры и повысить равномерность нагрева только практически. В данной статье приведены исследования потери веса цельных шишек для определения момента окончания процесса их СВЧ-нагрева с целью максимально сохранить качество выделенных семян.

Ключевые слова: *СВЧ-обработка; распределение интенсивности ЭМП; равномерность; целые шишки; потеря веса; автоматизация контроля*

Результаты исследований. Потери веса в исследуемых цельных шишках в результате микроволнового облучения представлены в табл. 1-3. Исследования проводились при 100% мощности микроволновой печи, и далее при 77% и 55% соответственно.

1. Целые сосновые шишки помещены в микроволновую печь мощностью 700 Вт на 30 секунд. В результате температура внутри шишек достигла 80 градусов, а средняя потеря влаги составила 11,38%.

Таблица 1 – Потеря веса в исследуемых шишках при 100% мощности (700 Вт)

Масса шишки, г		Разница	Потеря влаги, %
до облучения	после облучения		
8,13	7,14	0,99	12,8
9,47	8,30	1,17	12,35
8,56	7,69	0,87	10,16
7,93	7,23	0,7	8,83
10,03	8,75	1,28	12,76

К сожалению, этого оказалось недостаточно — шишки практически не раскрылись, а появившийся запах гари свидетельствовал о перегреве, что могло повредить и испортить семена внутри.

2. Во втором эксперименте цельные шишки были помещены под воздействие микроволн мощностью 539 Вт в течение 40 секунд. Это время было выбрано для достижения оптимального нагрева – внутренняя температура шишек поднялась до 67 градусов Цельсия. Средняя потеря влаги составила 15,26%

Таблица 2 – Потеря веса в исследуемых шишках при 77% мощности (539 Вт)

Масса шишки, г		Разница	Потеря влаги, %
до облучения	после облучения		
7,57	6,53	1,04	13,74
7,24	6,33	0,91	12,57
8,22	6,88	1,34	16,3
6,65	5,39	1,26	18,95
5,28	4,5	0,78	14,77

Такой режим нагрева позволил сохранить целостность шишек и обеспечить благоприятные условия для дальнейшего прорастания семян, извлечённых из них, но после опыта был легкий дым от испытуемых шишек. Во время опыта тщательно контролировали время и мощность микроволн, чтобы получить критерии автоматизации.

3. В третьем эксперименте исследуемые образцы находились под воздействием меньшей мощности, составляющей лишь 385 Вт, однако продолжительность экспозиции увеличилась, достигнув 55 секунд. Подобное сочетание параметров привело к достижению температуры – порядка 60 °C.

Таблица 3 – Потеря веса в исследуемых шишках при 55 % мощности (385 Вт)

Масса шишки, г		Разница	Потеря влаги, %
до облучения	после облучения		
7,33	6,23	1,1	15,01
5,24	4,38	0,86	16,41
7,38	5,96	1,42	19,24
6,15	5,12	1,03	16,75
6,94	5,9	1,04	14,99

Подобное сочетание параметров привело к достижению относительно низкой конечной температуры – порядка 60 °C.

Несмотря на существенно уменьшенную энергетическую нагрузку, такая процедура позволила заметно ускорить процессы объемного расширения структур шишек, минимизировав риск появления признаков ожога поверхности и сохранив целостность оболочки. Средняя потеря влаги составила 16,48%, вероятно, это связано с увеличением времени воздействия радиации на материал, которое обеспечило достаточное удаление избыточной влаги из структуры материала, без закрытия пор шишек при более мощных воздействиях.

На рис. 1-4 представлены процессы проведения исследований: шишки до и после сушки; измерение температуры; измерение веса; выделенные семена соответственно.

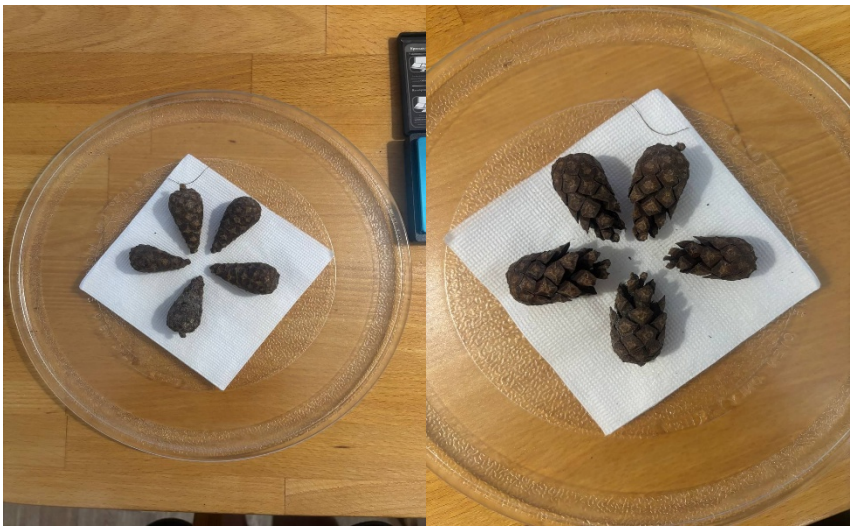


Рис. 1 – Шишки до (слева, закрытые) и после (справа, раскрытые) СВЧ-обработки

Рис. 2 – Исследуемая сосновая шишка до и после микроволнового облучения на весах

Рис. 3 – Измерение температуры шишек

Рис. 4 – Извлеченные семена сосновой шишки

Заключение. Подводя итог, микроволновая обработка [1] стимулировала активное расширение древесных волокон, ускоряя естественный процесс раскрытия целых шишек и обеспечивая беспрепятственное освобождение содержащихся в них ценных семян. Данный

подход продемонстрировал свою эффективность, предоставляя четкое понимание воздействия определенной мощности и продолжительности облучения целых шишек [2-5]. Третий опыт показывает нам позитивные стороны мягкого режима обработки сосновых шишек микроволнами: низкий риск перегрева, сохранение природных свойств сырья и значительное повышение выхода семян высокого качества благодаря значительным потерям влаги и предотвращению возникновения обгорания. Таким образом он может быть выбран за критерий автоматизации обработки семян. Установка при этом должна содержать волоконно-оптические датчики веса, температуры и распределения поля в СВЧ-печи [6, 7], как для контроля указанных параметров, так и всего процесса экстракции семян в целом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

Список литературы

1. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (проблемы и реализации) / Под ред. Г.А Морозова и Ю.Е. Седельникова // Москва: Радиотехника, 2003.
2. *Петрова А.З. и др.* Исследование процесса микроволнового нагрева сосновых шишек для выделения из них семян высокого качества // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2. № 4. С. 32-40.
3. *Петрова А.З. и др.* Методы повышения однородности нагрева шишек при микроволновой обработке // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 5. С. 226-228.
4. *Петрова А.З. и др.* Пространственная математическая модель СВЧ-нагрева шишки и плоского диэлектрика // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 6. С. 95-98.
5. *Петрова А.З. и др.* Одномерный метод расщепления многомерных задач для контроля свч нагрева шишек // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 6. С. 91-94.
6. *Кувшинов Н.Е. и др.* Радиофотонная система бесконтактного измерения распределения температур в обрабатываемом материале в условиях закрытой рабочей камеры лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2023. Т. 3. № 1. С. 56-81.
7. *Кувшинов Н.Е. и др.* Квазираспределенная волоконно-оптическая сенсорная сеть для контроля распределения интенсивности ЭМП и температуры в закрытой рабочей СВЧ-камере модернизированным калориметрическим методом // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2. № 2. С. 56-81.

2.3.3.

[1]Д.А. Сайфутдинов, [1]А.З. Петрова, [1]Г.А. Морозов, [1]Д. Даххам,
[1]О.Г. Морозов, [2]С.В. Смирнов, [2]М.И. Гараев

[1]Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, кафедра радиофотоники и микроволновых технологий,
[2]Казанский юридический институт МВД РФ,
кафедра экономики, финансового права и информационных технологий в деятельности ОВД,
Казань, OGMorozov@kai.ru

АНАЛИЗ ПОТЕРИ ВЕСА КАК КРИТЕРИЙ КОНТРОЛЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СВЧ НАГРЕВА ПОЛОВИН ШИШЕК

В отличие от классических тепловых печей, нагрев шишек в СВЧ -печах для экстракции семян происходит не только по их поверхности, но и по его объёму: радиоволны СВЧ-частот проникают примерно на 1,5-2,5 см вглубь шишек. Это сокращает время нагрева; средняя скорость нагрева составляет 0,3-0,5 °С в секунду. Более того, процесс нагрева зависит от состава и влажности шишек, что требует точной настройки режима работы СВЧ-печи для достижения оптимальных результатов и предотвращения перегрева. В данной статье приведены исследования потери веса шишек, разделенных пополам вдоль длинной оси, для определения момента окончания процесса их СВЧ-нагрева по сравнению с целыми шишками с целью максимально сохранить качество выделенных семян.

Ключевые слова: *СВЧ-обработка; распределение интенсивности ЭМП; равномерность; половины шишек; потеря веса; автоматизация контроля.*

Результаты исследований. В данном разделе представлен интересный эксперимент, цель которого состояла в изучении особенностей сосновых шишек, предварительно разрезанных пополам стандартной пилой (рис. 1.

Исследовались скорость раскрытия и интенсивность потери влаги из половин шишек под воздействием микроволнового излучения мощностью 385 Вт (выбран как лучший режим обработки целых шишек). Также рассмотрим эффективность расположения шишек распиленной стороной вверх или вниз.

Рис. 1 – Разрезанные пополам сосновые шишки

Потери веса в исследуемых разрезанных пополам шишках в результате микроволнового облучения представлены в табл. 1-2. В табл. 1 и на рис. 2 это показано для половин шишек, уложенных разрезом вниз.

Таблица 1 – Потеря веса в половинках шишек (уложены разрезанной поверхностью вниз)

Масса половинки шишки, г		Разница	Потеря влаги, %
до облучения	после облучения		
3,8	3,07	0,73	19,21
4,32	3,63	0,69	15,97
5,01	4,13	0,88	17,56
4,25	3,48	0,77	18,12
3,46	2,93	0,53	15,32

Рис. 2 – Разрезанные пополам сосновые шишки до и после микроволнового облучения (уложены разрезанной поверхностью вниз)

Когда разрезанная поверхность соприкасается с подложкой, контакт с твердым материалом замедляет потерю влаги. Средняя потеря влаги составила 17,24%. Верхний неповрежденный слой, так скажем, служит защитником для внутренних слоев, частично ограничивая распространение тепла и ослабляя риск чрезмерного нагрева центральной области разрезанной шишки.

В табл. 2 и на рис. 3 это показано для половин шишек, уложенных разрезом вниз.

Таблица 3 – Потеря веса в половинах шишек (уложены разрезанной поверхностью вверх)

Масса половинки шишки, г		Разница	Потеря влаги, %
до облучения	после облучения		
2,5	1,98	0,52	20,8
4,35	3,36	0,99	22,76
2,29	1,82	0,47	20,52
3,28	2,62	0,66	20,12
3,82	3,12	0,7	18,32

Рис. 3 – Разрезанные пополам сосновые шишки до и после микроволнового облучения (уложены разрезанной поверхностью вверх)

Такое размещение обеспечивает максимальную открытость внутренних слоев шишки и ускоряет выделение влаги наружу. Средняя потеря влаги составила – 20,5%. Тепло распространяется преимущественно сверху вниз, что гарантирует глубокий прогрев сердцевины шишки. Поскольку верхняя сторона разреза открыта, половина шишки высушивается быстрее, что повышает контраст температур между верхней и нижней частями шишки.

Однако стоит учесть, что такое положение может увеличивать риск перегрева и образования поверхностных дефектов, таких как трещины или подгорание.

Заключение. Для получения лучших результатов и повышения эффективности извлечения семян рекомендуется размещать разрезанные шишки разрезанной частью вверх. Такое расположение позволит своевременно контролировать динамику выделения влаги и предотвратит накопление лишней влаги внутри шишки. Хотя возможны и некоторые негативные последствия, такие как быстрое высыхание внешних слоев. Но этот недостаток компенсируется возможностью прямого наблюдения за ходом эксперимента и своевременной коррекции параметров микроволнового воздействия.

Данный подход продемонстрировал свою эффективность, предоставляя четкое понимание воздействия определенной мощности и продолжительности облучения на половины шишек [1-5]. Выбранный режим, как и у целых шишек, показывает нам позитивные стороны мягкого режима обработки сосновых шишек микроволнами: низкий риск перегрева, сохранение природных свойств сырья и значительное повышение выхода семян высокого качества благодаря значительным потерям влаги и предотвращению возникновения обгорания. Таким образом он может быть выбран за критерий автоматизации обработки шишек, разрезанных пополам для экстракции семян. Установка при этом должна содержать кроме волоконно-оптических датчиков веса, температуры и распределения поля в СВЧ-печи [6, 7], еще и датчики влажности, особенно важные для контроля процесса раскрытия шишек, уложенных разрезом вверх параметров, при котором выделение влаги имеет большую скорость. Таким образом, контроль всего процесса экстракции семян может быть автоматизирован.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

Список литературы

1. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (проблемы и реализации) / Под ред. Г.А Морозова и Ю.Е. Седельникова // Москва: Радиотехника, 2003.
2. *Петрова А.З. и др.* Исследование процесса микроволнового нагрева сосновых шишек для выделения из них семян высокого качества // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2. № 4. С. 32-40.
3. *Петрова А.З. и др.* Методы повышения однородности нагрева шишек при микроволновой обработке // Научно-технический вестник Поволжья. 2023. № 5. С. 226-228.
4. *Петрова А.З. и др.* Пространственная математическая модель СВЧ-нагрева шишки и плоского диэлектрика // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 6. С. 95-98.
5. *Петрова А.З. и др.* Одномерный метод расщепления многомерных задач для контроля свч нагрева шишек // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 6. С. 91-94.
6. *Кувшинов Н.Е. и др.* Радиофотонная система бесконтактного измерения распределения температур в обрабатываемом материале в условиях закрытой рабочей камеры лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2023. Т. 3. № 1. С. 56-81.
7. *Кувшинов Н.Е. и др.* Квазираспределенная волоконно-оптическая сенсорная сеть для контроля распределения интенсивности ЭМП и температуры в закрытой рабочей СВЧ-камере модернизированным калориметрическим методом // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2. № 2. С. 56-81.
8. *Кувшинов Н.Е. и др.* Радиофотонная система измерений распределения температур и интенсивности электромагнитного поля в рабочей камере лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 3 (51). С. 77-92.

2.3.3.

[1]А.А. Чесноков, [1]А.Р. Насыбуллин, [1]Т.М. Ишкаев,
[1]Р.В. Фархутдинов, [1]О.В. Никишина, [2]С.Г. Алюшина, [1]В.И. Баязитова

[1]Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ,
кафедра радиофотоники и микроволновых технологий,
Казань,
[2]МФЮУ МФЮА,
Москва, OGMorozov@kai.ru

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ НА КОЛЬЦЕВОМ РЕЗОНАТОРЕ

Для измерения диэлектрических свойств материала пользователю необходимо знать соответствующие методы измерения и преобразования. Необходимо использовать методы, адаптированные для измеряемого материала, поскольку конкретный метод применим к конкретному материалу. Если использовать неадаптированные методы, результаты измерений будут неудовлетворительными. Одним из универсальных методов является метод кольцевого резонатора. Процедуры и математическое обеспечение определения удельной плотности веществ и материалов с помощью данного метода рассматриваются в данной статье.

Ключевые слова: *вещества и материалы; удельная плотность; микроволновая сенсорика; метод кольцевого резонатора; математическое обеспечение.*

Основы метода. Кольцевой резонатор представляет собой двухпортовую передающую линейную структуру, состоящую из входной питающей линии, замкнутого контура, выходной питающей линии и двух зазоров связи, как показано на рис. 1.

Кольцо – это проводник, несущий сигнал в микрополосковой конфигурации. Под кольцом находится диэлектрик печатной платы (ПП) постоянной толщины и проницаемости, а под диэлектриком – металлическая заземляющая плоскость [1].

Радиочастотная (РЧ) энергия поступает в резонатор и выходит из него через линии передачи и зазоры связи.

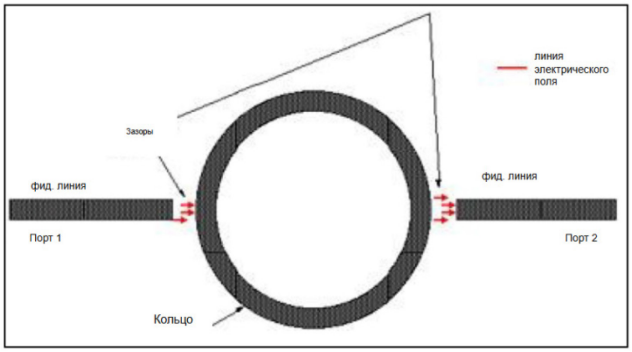


Рис. 1 - Традиционный кольцевой резонатор: вид сверху [1]

Резонанс устанавливается, когда длина волны РЧ, распространяющейся в линии передачи (или кратная ей интегральная величина), равна окружности кольца

$$2\pi r_{avg} = n\lambda_g, \quad (1)$$

$$r_{avg} = \frac{1}{2}(r_i + r_0), \quad (2)$$

где r_{avg} радиус кольца, усредненный между его внутренним радиусом r_i и внешним радиусом r_0; λ_g – длина направляющей волны; n – номер моды.

Основная резонансная частота кольца f_0, соответствующая n = 1, равна

$$f_0 = \frac{v}{\lambda_g} = c/\lambda_g\sqrt{|\varepsilon_{eff}|}, \quad (3)$$

где c – скорость света в вакууме; ε_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость ненагруженной структуры линии передачи.

На этой частоте двухпортовый коэффициент передачи |S21|, измеренный от входной линии питания до выходной линии питания, достигает локального максимума. Максимумы наблюдаются также при $n = 2, 3, 4\ldots$, соответствующих целым кратным основной частоты ($2f_0, 3f_0, 4f_0$ и т. д.).

Смоделированные максимумы коэффициента передачи показаны на рис. 2. Изменение резонанса кольца, измеренное в присутствии диэлектрического образца, и изменение резонанса, измеренное в его отсутствие, позволяет рассчитать проницаемость.

Концепция измерений. Рисунки 3, 4 и 5 иллюстрируют концепцию измерений. В пример использован кольцевой резонатор с меандровой линией на 350 МГц.

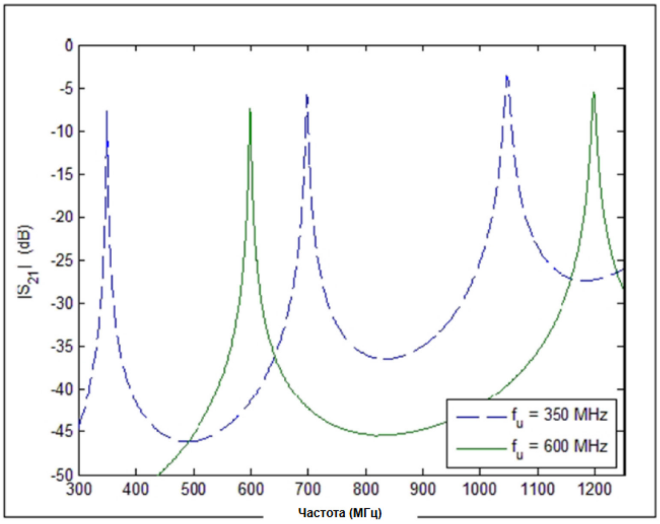


Рис. 2 - Коэффициент передачи |*S*21| в зависимости от частоты для двух смоделированных кольцевых резонаторов: показаны первые три гармоники резонатора с частотой 350 МГц и первые две гармоники резонатора с частотой 600 МГц

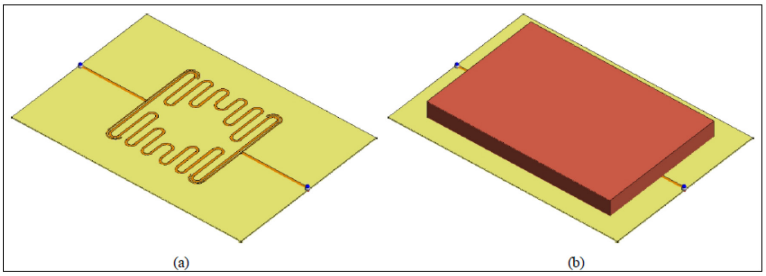


Рис. 3 - Кольцевой резонатор и размещение образца, необходимое для измерения удельной плотности: (a) резонатор оставлен без нагрузки, (b) резонатор нагружен диэлектрическим образцом.

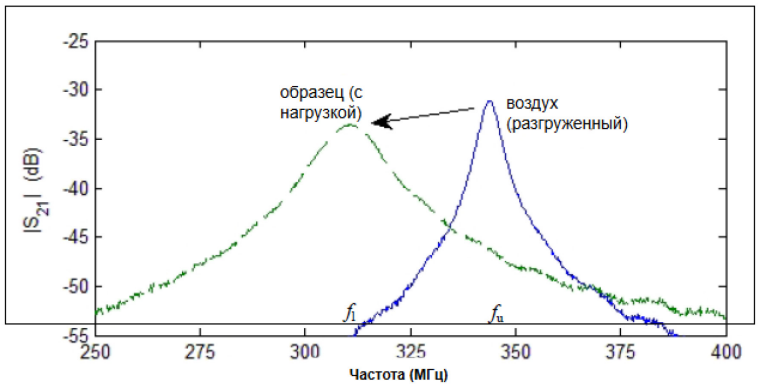


Рис. 4 - Трассы данных для измерения удельной плотности до и после размещения диэлектрической нагрузки

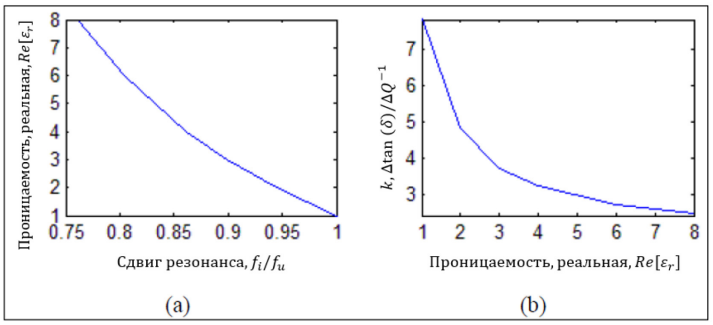


Рис. 5 - Кривые, используемые для определения диэлектрической проницаемости образца, построенные с помощью моделирования: (a) действительная часть ε_r, (b) значение k, используемое для расчета мнимой части ε_r

Сначала резонатор оставляют без нагрузки, при этом пространство над кольцом занимает только воздух, как показано на рис. 3,a. Коэффициент передачи |S21| резонатора в воздухе регистрируется с помощью сетевого анализатора, как показано на рис. 4. Отмечается частота в резонансном пике, f_u, и коэффициент добротности резонанса, Q_u. Затем диэлектрический образец помещается поверх резонатора (или наоборот), как показано на рис. 3,b. Кольцо и образец прижимаются друг к другу так, чтобы они были заподлицо.

Для резонатора, нагруженного диэлектрическим образцом, записывается вторая характеристика |*S*21|, как показано на рис. 4. Отмечается новая резонансная частота, f_1, и коэффициент добротности, Q_1. Сдвиг пика резонанса по отношению к частоте указывает на действительную часть проницаемости, Re{ε} [1]. Расширение пика резонанса указывает на мнимую часть проницаемости, Im{ε}. Значения проницаемости обычно указываются после их нормализации к проницаемости свободного пространства:

$$\varepsilon = Re\{\varepsilon\} + jIm\{\varepsilon\}, \tag{4}$$

$$\varepsilon_r = \frac{Re\{\varepsilon\}}{\varepsilon_0} + j\frac{Im\{\varepsilon\}}{\varepsilon_0} = Re\{\varepsilon_r\} + j\ Im\{\varepsilon_r\}, \tag{5}$$

где $\varepsilon = 8{,}85 \times 10^{-12}$ Ф/м.

Величины $Re\{\varepsilon_r\}$ и $Im\{\varepsilon_r\}$ собой действительную и мнимую части относительной диэлектрической проницаемости, соответственно.

Каждый кольцевой резонатор (и каждая гармоника его основного резонанса) имеет характерную кривую зависимости $Re\{\varepsilon_r\}$ от резонансной частоты, как показано на рис. 5,a. Эти кривые получены путем многократного моделирования с использованием образцов с различными диэлектрическими постоянными [2, 3]. Из измеренных данных вычисляется отношение резонансных пиков, f_l/f_u . Это отношение является значением x на рис. 5,a. Действительная часть диэлектрической проницаемости – это соответствующее значение y вдоль этой кривой.

Мнимая часть проницаемости образца определяется с помощью рис. 5,b. Здесь действительная часть проницаемости – это значение x вдоль кривой. Значение y — это k,

константа, которая указывает на изменчивость тангенса угла потерь образца для данного $Re\{\varepsilon_{(r)}\}$:

$$\tan\delta = k\left(\frac{1}{Q_l} - \frac{1}{Q_u}\right), \quad (6)$$

Мнимая часть проницаемости связана с тангенсом угла потерь следующим образом

$$\tan\delta = \frac{\mathrm{Im}[\varepsilon_\mathrm{r}]}{\mathrm{Re}[\varepsilon_\mathrm{r}]} + \frac{\sigma}{\omega \mathrm{Re}[\varepsilon_\mathrm{r}]} \approx \frac{\mathrm{Im}[\varepsilon_\mathrm{r}]}{\mathrm{Re}[\varepsilon_\mathrm{r}]}, \quad (7)$$

где σ – проводимость; ω – частота измерения.

Предполагается, что величина $\sigma\,/\omega\, Re\{\varepsilon_r\}$ пренебрежимо мала на ВЧ. Таким образом, $Im\{\varepsilon_r\}$ рассчитывается путем объединения уравнений (6) и (7) в

$$lm[\varepsilon_r] = k\left(\frac{1}{Q_1} - \frac{1}{Q_u}\right) Re[\varepsilon_r], \quad (8)$$

Преимущества метода кольцевого резонатора. Метод кольцевого резонатора позволяет измерять как твердые тела, так и жидкости [1]. Образец не нужно фрезеровать, например, для установки в держатель коаксиальной линии или воздушного зазора [4], но он должен быть сплющен или обрезан с одной стороны так, чтобы между резонатором и образцом во время измерения сохранялся плоский контакт. Поскольку кольцевой резонатор измеряет проницаемость диэлектрика в пределах примерно 2,5 см от кольца, и так как типичное кольцо имеет размер 7,5×7,5 см, требуется около 10 см каждого образца [14].

После калибровки сетевого анализатора время, необходимое для подготовки образца поверх кольца, записи широкополосной характеристики и расчета действительной и мнимой частей проницаемости, обычно составляет менее 2 мин для одного кольцевого резонатора. Поскольку пространственные вариации проницаемости (например, из-за разного размера зерен почвы в одном образце) не усредняются в рамках отдельных измерений, необходимо провести несколько испытаний для каждой точки данных, а затем усреднить их, чтобы получить суммарное значение ε для образца с вариациями ε [1].

Возможно, самым важным преимуществом метода кольцевого резонатора является то, что для измерения в СВЧ- системах [5-9] не требуется перемещать диэлектрический образец из его исходного положения. Образцы не нужно сохранять и транспортировать с датчиком, достаточно одной калибровки. Количество измерений, которые могут быть выполнены ограничено только доступной памятью системы сбора данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения обязательств по Программе стратегического академического лидерства Приоритет-2030.

Список литературы

1. *Abou-Khousa M.A. et al.* Novel and Simple High-Frequency Single-Port Vector Network Analyzer // IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques. 2010. V. 59. No. 3. P. 534-542.

2. *Hoffmann K., Skvor Z.* A Novel Vector Network Analyzer // IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques. 1998. V. 46. No. 12. P. 2520-2523.

3. *Морозов О.Г. и др.* Двухчастотный метод определения параметров резонансных датчиков СВЧ-диапазона // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 1 (20). С. 76-86.

4. *Морозов Г.А. и др.* Коаксиальные брэгговские СВЧ-структуры в сенсорных системах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 3. С. 65-70.

5. *Морозов Г.А. и др.* Функционально адаптивные СВЧ-технологии в задачах переработки термопластичных полимерных материалов // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2011. № 3 (13). С. 13-24.

6. *Кувшинов Н.Е. и др.* Радиофотонная система бесконтактного измерения распределения температур в обрабатываемом материале в условиях закрытой рабочей камеры лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2023. Т. 3. № 1. С. 56-81.

7. *Кувшинов Н.Е. и др.* Квазираспределенная волоконно-оптическая сенсорная сеть для контроля распределения интенсивности ЭМП и температуры в закрытой рабочей СВЧ-камере модернизированным калориметрическим методом // Электроника, фотоника и киберфизические системы. 2022. Т. 2. № 2. С. 56-81.

8. *Кувшинов Н.Е. и др.* Радиофотонная система измерений распределения температур и интенсивности электромагнитного поля в рабочей камере лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 3 (51). С. 77-92.

9. *Морозов Г.А. и др.* Микроволновая обработка термореактивных и термопластичных полимеров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 3. С. 114-121.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ — 2.3.6.

2.3.6.

[1,2]Д.В. Кондратов, [1]Л.А. Кочкуров, [1]Н.Ю. Хороводова

[1]Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
[2]Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук (ИПТМУ РАН),
Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,
Саратов, kondratovdv@yandex.ru, lkochkurov@gmail.com, nkhorovodova@mail.ru

АНАЛИЗ РИСКОВ НАРУШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИПТОВАЛЮТ И КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ КОШЕЛЬКОВ

Статья посвящена основных проблем криптовалют и криптокошельков с точки зрения информационной безопасности. Сделан общий обзор существующих организационных и правовых мер, требующих решения в настоящее время. Предложены основные решения рассмотренных проблем.

Ключевые слова: *криптовалюта, криптографические кошельки, информационная безопасность, технологии блокчейн.*

Криптовалюты стали значимой частью современного финансового мира, предлагая уникальные возможности для инвестирования, торговли и сбережений. Однако, вместе с их популярностью, возникли и значительные проблемы безопасности, требующие внимания как пользователей, так и профессионалов в области криптографии и кибербезопасности. Аргументированное понимание угроз и методов защиты является ключевым аспектом успешного и безопасного взаимодействия с криптовалютами. Однако, несмотря на очевидные преимущества, безопасность использования криптовалют и их соответствующих кошельков остается актуальной темой, особенно в контексте современных реалий России.

1. Кризис доверия и правовая неопределенность

Одной из основных угроз для пользователей криптовалют в России является правовая неопределенность. На протяжении многих лет правительство страны выстраивало различные стратегии по регулированию криптовалют, что создало значительный уровень неопределенности для инвесторов и пользователей. В 2020 году был принят закон "О цифровых финансовых активах" [1], который определяет правовую природу криптовалют, однако многие аспекты остаются недостаточно четкими. Например, криптовалюты не имеют статуса законных платежных средств, что поднимает вопросы касательно защиты прав пользователей и ответственности в случае кибератак или мошеннических действий.

Отсутствие четких нормативных актов, кроме [2, 3] также затрудняет защиту прав потребителей и уменьшает уровень доверия к криптовалютным платформам и кошелькам. Это создает условия для мошенничества, поскольку пользователи не всегда могут легко обратиться за юридической защитой в случае потерь.

2. Угрозы кибербезопасности

Безопасность использования криптовалют и криптографических кошельков в значительной степени зависит от уровня кибербезопасности. В России наблюдается рост киберпреступности, что вызывает серьезные опасения для пользователей. Существует множество типов угроз, которые могут привести к потере средств[4]:

• Вредоносное ПО: Злоумышленники могут распространять вирусы или трояны, которые украдают доступ к приватным ключам или другим важным данным пользователей. Вредоносные программы часто маскируются под легитимные приложения или сервисы.

• Атаки «человек посередине» (MitM): Эти атаки включают перехват данных, передаваемых между пользователем и сервером, что позволяет злоумышленнику получить доступ к личной информации, необходимой для доступа к кошельку.

• Фишинг: Это одна из самых распространенных форм киберугроз, при которой злоумышленники подставляют фальшивые сайты для получения личных данных пользователей. Пользователи могут быть обмануты, введя свои учетные данные на поддельных веб-страницах, которые выглядят органично и правдоподобно.

• Социальная инженерия: Использование психологических манипуляций для получения конфиденциальной информации остается распространенной практикой. Злоумышленники могут действовать как законные лица, чтобы обмануть пользователей и получить их доступы.

3. Вопросы физической безопасности

Физическая безопасность криптовалютных кошельков также представляет собой важный аспект. Поскольку приватные ключи являются единственным доступом к средствам пользователя, их потеря или кража приводит к полной утрате управления активами. Неправильное физическое хранение таких устройств, как аппаратные кошельки, может привести к тому, что злоумышленник, получивший доступ к ним, будет в состоянии безоговорочно контролировать активы.

Для улучшения физической безопасности пользователи должны:

• Защищать и правильно хранить свои аппаратные кошельки.

• Создавать резервные копии приватных ключей и хранить их в защищенном месте, вдали от устройства, использующегося для доступа к криптовалютам.

• Использовать физические средства безопасности, например, сейфы, что может значительно уменьшить риск физического доступа к их устройствам.

4. Проблемы с управлением приватными ключами

Приватные ключи представляют собой критически важный элемент в экосистеме криптовалют. Поскольку они не подлежат восстановлению, потеря или утечка приватного ключа привлекает серьезные последствия, включая невозможность доступа к личным активам. Проблемы управления ключами могут возникнуть из-за:

• Неосведомленности пользователей о важности ключей.

• Неправильного хранения ключей, например, на облачных хранилищах, что увеличивает вероятность хакерских атак.

Необходимо проводить информирование пользователей криптовалют с целью повышения их знаний о безопасном обращении с приватными ключами.

5. Оценка надежности кошельков

Существует множество поставщиков криптовалютных кошельков, но не все они предлагают одинаковый уровень безопасности [5,6,7]. Важно проводить тщательную оценку, прежде чем выбирать конкретный кошелек. Примеры некоторых факторов, на которые следует обратить внимание, включают:

• Репутация разработчика: Изучение отзывов от других пользователей и экспертов поможет установить, насколько безопасен и надежен выбранный кошелек.

• Частота обновлений: Надежные кошельки получают регулярные обновления, что свидетельствует о приверженности разработчиков к безопасности.

• Механизмы защиты: Наличие многофакторной аутентификации и других дополнительных мер безопасности — важные факторы, способствующие выбору.

6. Потребность в стандартах и регулировании

Дефицит четких стандартов и регулирования в области криптовалют в России создает дополнительные угрозы [9]. Отсутствие обязательных требований по безопасности криптографических кошельков позволяет недобросовестным разработчикам предлагать

уязвимые решения. Регулирование в этой области могло бы:

- Установить минимальные требования к безопасности для криптовалютных кошельков и их производителей.
- Создать механизм правовой защиты пользователей, что повысило бы уровень доверия к криптовалютным сервисам.
- Повысить уровень ответственности разработчиков за утечки данных и финансовые потери, связанные с уязвимостями в коде.

7. Образовательные инициативы

Образование и осведомленность — ключевые факторы в обеспечении безопасности использования криптовалют. Регулярные обучающие мероприятия и программы для пользователей помогут улучшить их понимание различных рисков, связанных с криптовалютами, а также критически важные аспекты безопасности, такие как управление приватными ключами и способы идентификации мошеннических схем. Также важным шагом станет внедрение образовательных курсов в учебные заведения, что поможет молодым специалистам быстрее адаптироваться к изменениям в финансовом и технологическом секторах.

Заключение и рекомендации

Проблематика использования криптовалют в России комплексна и многогранна. От правовых вопросов и мошенничества до технологических и культурных барьеров, все эти факторы оказывают значительное влияние на внедрение и развитие криптовалют в стране. Для решения этих проблем требуется согласованная политика как со стороны государства, так и со стороны сообщества, включая образование и улучшение инфраструктуры, что поможет создать безопасную и надежную среду для всех участников криптовалютного рынка.

Список литературы

1. Федеральный закон "О цифровых финансовых активах, цифровой валюте " от 31.07.2020 N 259-ФЗ общего пользования»
2. Федеральный закон "О противодействии легализации (отмыванию) доходов, полученных преступным путем, и финансированию терроризма" от 07.08.2001 N 115-ФЗ
3. Федеральный закон "О внесении изменений в части первую и вторую Налогового кодекса Российской Федерации и отдельные законодательные акты Российской Федерации от 29.11.2024 N 418-ФЗ
4. *Grishchenko I., & Liao Y.* (2020). Quantum Computing and Blockchain Security: A Survey. Journal of Computer Security . 2020.
5. Etherum Foundation. Ethereum White Paper. https://ethereum.org/en/whitepaper/.2021.
6 *Rubinstein B.I.P., & Asthana A.* Blockchain and Smart Contracts. Cambridge University Press.2019.
7. *Boucher, P., & Chourabi H.* Blockchain Technology in Financial Services. Springer.2019.
8. *Arvind Narayanan, Joseph Bonneau, Edward Felten, Andrew Miller, Steven Goldfeder* «Bitcoin and Cryptocurrency Technologies»2019.
9. *Маринкин Д.Н.* Проблемы информационной безопасности и криптографии пользователя современного блокчейна // ППД. 2019. №3. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-informatsionnoy-bezopasnosti-i-kriptografii-polzovatelya-sovremennogo-blokcheyna (дата обращения: 02.06.2025)

2.3.6.

А.Н. Прилепский, С.В. Литвинов

МИРЭА - Российский технологический университет,
Институт радиоэлектроники и информатики,
Москва, Litvinov_S@mirea.ru

ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ M-PSK-СИГНАЛОВ НА СТЕНДЕ KEYSIGHT-PROPSIM

В условиях стремительного развития беспроводных технологий особую актуальность приобретает задача повышения надёжности передачи данных в многолучевых каналах связи. В статье рассматривается проблема оценки помехоустойчивости многопозиционных сигналов PSK (Phase Shift Keying) в условиях замираний и многолучевого распространения. Результаты могут быть полезны при проектировании устойчивых к помехам телекоммуникационных систем, особенно в условиях городской среды и мобильных сетей нового поколения.

Ключевые слова: *PSK, помехоустойчивость, многолучевое распространение.*

Введение. В современном мире беспроводные технологии связи играют ключевую роль в обеспечении высокоскоростной передачи данных, особенно в условиях стремительного роста объемов информации и требований к качеству сервиса. Среди множества факторов, определяющих эффективность беспроводной передачи, особое значение имеют характеристики канала связи и применяемые методы модуляции. Исследование помехоустойчивости различных видов цифровой модуляции позволяет повысить надежность передачи данных, оптимизировать использование частотного ресурса и снизить влияние шумов и искажений в реальных условиях эксплуатации [1,2]. В данной статье основное внимание уделено анализу влияния типа канала и количества лучей на вероятность битовой ошибки в зависимости от отношения сигнал/шум.

Описание лабораторной установки. Для проведения исследования был собран лабораторный стенд, состоящий из 4 элементов: генератора «Keysight M8190A», осциллографа «Rigol DS7024», спектрального анализатора «Rigol RSA5032N» и эмулятора среды распространения «Keysight Propsim F8». На рисунке 1 представлено используемое оборудование.

Рис. 1 – Лабораторная установка для проведения исследования

Представленная установка моделирует процесс передачи и приема PSK-сигналов с разной позиционностью в условиях многолучевого распространения радиоволн для дальнейшей оценки их помехоустойчивости. Сигнал с генератора подается после установки его начальных параметров: типа модуляции, позиционности, скорости передачи и несущей частоты. Затем с помощью специализированного программного обеспечения «IQTools», используя режим для создания сигналов, основанных на ортогональном частотном разделении каналов «OFDM Modulations», задаются необходимые параметры для формирования сигнала с одной поднесущей [3]. В итоге генерируется битовая последовательность, которая загружается в генератор и формируется на выходе заданного канала.

Методика исследования. В рамках исследования использовались две модели канала: радиоканал с замираниями (модель Релея) и Райсовский канал прямой видимости.

Релеевский канал представляет собой среду с глубокими замираниями, где прямой сигнал значительно ослаблен. В таком канале фаза коэффициента передачи имеет равномерное распределение, а амплитуда сигнала подчиняется рэлеевскому закону. Замирания возникают из-за интерференции множества рассеянных сигналов при сильном ослаблении прямой составляющей. Они приводят к существенным искажениям данных и являются наиболее выраженными среди всех типов замираний [4,5].

Райсовский канал, в отличие от релеевского, предполагает наличие как минимум одной прямой траектории распространения сигнала. Это означает, что помимо рассеянных волн, приемник получает и устойчивую прямую составляющую. В результате: принимаемый сигнал состоит из детерминированной и случайной компонент, а его амплитуда описывается райсовским распределением [6].

Релеевский канал типичен для городской среды, где замирания наиболее сильны. В пригородных и сельских условиях чаще наблюдается райсовский канал, поскольку там, наряду с рассеянными сигналами, присутствует и прямая составляющая [7,8].

Для подсчета битовой ошибки был создан XML-файл с битовой последовательностью, который использовался для синхронизации генератора и спектрального анализатора. Структура файла для одного из сигналов представлена на рисунке 2.

```
<RIGOL_VSA_KNOWN_DATA_FILE Version="01.00">
<Comment> BPSK </Comment>
<Base> 2 </Base>
<ModulationOrder> 2 </ModulationOrder>
<ResultLength> 200 </ResultLength>
<Data>
1111 0000 0000 1111 1111 0000 0000 1111
00101110101110110010100100100101100111000000111001010110011010010011111011001000001110111000101101010110111100011011000000001110111111011101101100011011011100110000010101101
0
</Data>
</RIGOL_VSA_KNOWN_DATA_FILE>
```

Рис. 2 – Пример файла конфигурации для сигнала BPSK

Сформированный файл был загружен во внутреннюю память спектрального анализатора. Далее совершен переход в режим VSA [9], в котором выполнялись следующие действия:

- Установлена несущая частота сигнала на 800 МГц;
- Выбран тип модуляции — BPSK/QPSK/8-PSK;
- Введена длина символьной последовательности;
- Введена символьная скорость — 2.5 МГц.

Затем производилась настройка эмулятора среды Propsim, где выбиралась необходимая модель канала, а также количество лучей.

Анализ результатов. Для оценки помехоустойчивости PSK-сигналов различной позиционности в условиях многолучевого распространения был проведён анализ зависимости вероятности битовой ошибки (BER) от отношения сигнал/шум (SNR) при изменении количества лучей для двух моделей каналов – Райса и Релея. Результаты представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1 – Зависимость SNR и BER от количества лучей для BPSK в Райсовском и Релеевском каналах:

BPSK				
Вид канала	Райса		Релея	
Кол-во лучей	3	4	3	4
SNR/ОСШ, дБ	15.3	12.5	10.2	7.2
BER	0.0001	0.0013	0.0091	0.0241

Таблица 2 – Зависимость SNR и BER от количества лучей для QPSK в Райсовском и Релеевском каналах:

QPSK				
Вид канала	Райса		Релея	
Кол-во лучей	3	4	3	4
SNR/ОСШ, дБ	15.4	12.5	10.1	7.3
BER	0.0003	0.0033	0.0213	0.0734

Таблица 3 – Зависимость SNR и BER от количества лучей для 8-PSK в Райсовском и Релеевском каналах:

8-PSK				
Вид канала	Райса		Релея	
Кол-во лучей	3	4	3	4
SNR/ОСШ, дБ	15.0	12.2	10.4	7.3
BER	0.0007	0.0078	0.0437	0.1123

Значения SNR (отношение сигнал/шум) определялись в режиме DMA с помощью встроенного функционального блока анализатора, при этом усреднение выполнялось по результатам 100 измерений.

По результатам измерения качества приема сигнала можно сделать вывод, что при увеличении количества отраженных лучей падает среднее значение SNR и растёт вероятность ошибочного приема.

Заключение. Анализ результатов показал, что помехоустойчивость сигналов существенно снижается при увеличении количества отражённых лучей, особенно в условиях релеевского канала, характерного для плотной городской застройки. При этом модуляции с меньшим числом фазовых состояний (BPSK, QPSK) демонстрируют более высокую устойчивость к помехам по сравнению с 8-PSK. Также установлено, что наличие прямой видимости в канале (райсовская модель) существенно снижает вероятность битовой ошибки при одинаковом уровне SNR.

Работа выполняется в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (соглашение от 31.03.2025 № 075-15-2025-020, федеральный проект «Университеты для поколения лидеров» национального проекта «Молодежь и дети»)

Список литературы

1. *Надымов А.В.* Исследование помехоустойчивости систем радиосвязи, использующих OFDM модуляцию // ГИАБ. 2014. №S12-3. Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-pomehoustoychivosti-sistem-radiosvyazi-ispolzuyuschih-ofdm-modulyatsiyu (дата обращения: 04.05.2025).
2. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Вильямс, 2020. – 1104 с.
3. KEYSIGHT TECHNOLOGIES. IQTools – Waveform Generation Tool User Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.keysight.com (дата обращения: 07.05.2025).
4. *Киселева Т.П.* Исследование прохождения квантованной первичной синхронизирующей последовательности (PSS) в технологии LTE OFDMA через модель канала с замираниями / Киселева Т. П. // Цифровая обработка сигналов: научно-технический журнал / КБ волоконно-оптических приборов. М. 2019. № 4. С. 55-62: ил. ISSN 1684-2634.
5. *Вьен Д.Н., Нгуен Х.Л., Тан-Чиен Т.* Статистические свойства моделей релеевских замираний в беспроводных коммуникациях // UD Journal of Science and Technology. — 2012. — Т. 8. — С. 262-269. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/231513476 (дата обращения: 02.05.2025).
6. *Прокис Дж., Маналкис Д.* Цифровая связь: Пер. с англ. — 5-е изд. — М.: McGraw-Hill, 2007. — 1152 с.
7. *Ермолаев В.Т.* Адаптивная пространственная обработка сигналов в системах беспроводной связи/ В.Т. Ермолаев, А.Г. Флаксман. - Нижний Новгород, 2006. - 99 с.
8. *Волков Л.Н.* Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учебное пособие/ Л.Н. Волков, М.С. Немировский, Ю.С. Шинаков. - М.: Эко - Трендз, 2005. - 392 с.
9. RIGOL (SUZHOU) TECHNOLOGIES INC. Vector Signal Analysis Measurement Application [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rigolna.com (дата обращения: 07.05.2025).

АННОТАЦИИ
ABSTRACTS

Н.Е. Бортулев
ОЦЕНКА НЕСТАЦИОНАРНОГО ОТРАВЛЕНИЯ РЕАКТОРА КСЕНОНОМ В РЕЖИМЕ МАНЕВРИРОВАННИЯ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Ключевые слова: машинное обучение, отравление реактора ксеноном, маневрирование реактора.

В данной работе с помощью программы Wims создаются обучающая и тестовые модели реактора, для каждой модели генерируются режимы работы реактора на разных уровнях мощности. Набор данных, полученный из обучающей модели реактора, используется для обучения модели, которая предсказывает изменение запаса реактивности реактора в режиме маневрирования. Машинное обучение производится методом линейной регрессии с помощью библиотеки scikitlearn языка программирования Python. Результаты прогнозирования изменения величины запасы реактивности во времени, полученные с помощью модели машинного обучения, сравниваются с данными об изменении величины запаса реактивности во времени полученных из расчета 3-ех тестовых моделей реактора, полученных с помощью программы Wims.

N.E. Bortulev
ASSESSMENT OF TRANSIENT XENON POISONING OF A REACTOR IN THE MANEUVERING MODE BY MACHINE LEARNING METHODS

Keywords: machine learning, xenon reactor poisoning, reactor maneuvering.

Using the Wims program, training and test reactor models, for each model, reactor operating modes are generated at different power levels. The dataset obtained from the training reactor model is used to train the models, which predicts the change in the reactivity margin of the reactor in the maneuvering mode. The machine learning model is trained using the linear regression method using the scikitlearn library of the Python programming language. The results of predicting the change in the reactivity margin over time obtained using the machine learning model are compared with the data on the change in the reactivity margin over time obtained from the calculation of 3 test reactor models obtained using the Wims program.

К.А. Брыксин, И.Л. Пластун
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ ГИАЛУРОНОВОЙ КИСЛОТЫ С ВОДОЙ

Ключевые слова: ИК-спектр, молекулярное моделирование, теория функционала плотности, водородные связи.

Методами квантовохимического молекулярного моделирования изучены проявления межмолекулярного взаимодействия на основе водородных связей в ИК спектрах гиалуроновой кислоты и в смесях гиалуроновой кислоты с молекулами воды. На основе расчета структуры молекулярных комплексов и соответствующих им ИК-спектров с последующим анализом параметров образующихся водородных связей даны оценки степени комплексообразования гиалуроновой кислоты с водой.

K.A. Bryksin, I.L. Plastun
ANALYSIS OF INTERMOLECULAR INTERACTION AND COMPLEXATION OF HYALURONIC ACID WITH WATER

Keywords: IR spectrum, molecular modeling, density functional theory, hydrogen bonds.

Manifestations of intermolecular interaction based on hydrogen bonding in the infrared spectra of hyaluronic acid and in mixtures of hyaluronic acid with water molecules have been studied using quantum chemical molecular modeling. Based on the calculation of molecular complexes structure and their corresponding IR spectra, followed by an analysis of the parameters of the hydrogen bonds formed, estimates of the strength of the complexation of hyaluronic acid with water were given.

Е.К. Бурнышев, Ю.Г. Медведев, Н.В. Пустовой
КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ ТОЧЕЧНОГО МОНОХРОМНОГО КОГЕРЕНТНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Ключевые слова: клеточные автоматы, электромагнитные волны, имитационное моделирование.

В работе представлены клеточно-автоматная модель электромагнитной волны, распространяющейся от монохромного когерентного направленного источника, и ее программная реализация. Приведены результаты компьютерных экспериментов, которые показывают соответствие разработанной модели физике процесса распространения электромагнитных волн.

E.K. Burnyshev, Yu.G. Medvedev, N.V. Pustovoy
CELLULAR AUTOMATA MODEL OF A POINT MONOCHROME COHERENT SOURCE OF ELECTROMAGNETIC WAVES

Keywords: cellular automata, electromagnetic waves, simulation modeling.

This paper presents a cellular-automaton model of an electromagnetic wave propagating from a monochrome coherent directional source, and its software implementation. The results of computer experiments are presented, which show the correspondence of the developed model to the physics of the process of electromagnetic wave propagation.

И.Н. Гарькин, Л.В. Левицкая,
Д.С. Кремнев, М.А. Воробьев
ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПУАССОНОВСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ ЭКСПЕРТИЗЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Ключевые слова: промышленная безопасность, угольные шахты, пуассоновское распределение, анализ риска, вероятностное моделирование, аварийные события, инциденты, статистика происшествий.

Особенности применения пуассоновского распределения для количественной оценки вероятности возникновения аварийных и инцидентных событий при проведении экспертизы промышленной безопасности на угольных шахтах. Представлен детальный анализ предпосылок использования данной модели, включая независимость, редкость событий, и постоянство

I.N. Garkin, L.V. Levitskaya,
D.S. Kremnev, M.A. Vorobyov
FEATURES OF USING POISSON DISTRIBUTION IN INDUSTRIAL SAFETY EXAMINATION OF COAL MINES

Keywords: industrial safety, coal mines, Poisson distribution, risk analysis, probabilistic modeling, emergency events, incidents.

Features of the Poisson distribution application for quantitative assessment of the probability of occurrence of accidents and incidents during industrial safety assessment in coal mines. A detailed analysis of the prerequisites for using this model is presented, including independence, rarity of events, and constancy of the average rate of occurrence of incidents over time. The correspondence of the

среднего показателя возникновения происшествий во времени. Оценивается соответствие характеристик пуассоновского распределения реальной статистике аварий и инцидентов в угольной промышленности. Выделяются ограничения подхода, связанные с возможным влиянием сезонных факторов, периодичности технико-технологических процессов, переменной интенсивности опасных событий.

characteristics of the Poisson distribution to the real statistics of accidents and incidents in the coal industry is assessed. Limitations of the approach related to the possible influence of seasonal factors, periodicity of technical and technological processes, and variable intensity of hazardous events are highlighted.

И.Н. Гарькин, Л.В. Левицкая, Д.С. Кремнев, М.А. Воробьев
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ АНАЛИЗЕ СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Ключевые слова: промышленная безопасность, угольные шахты, стохастические модели, анализ риска, вероятностное моделирование, аварийные события, инциденты, статистика происшествий.

В современных условиях эксплуатации угольных шахт вопросы обеспечения безопасности и устойчивости конструкций приобретают особую значимость. Многообразие воздействующих нагрузок, сложные геолого-технические условия, наличие случайных факторов обуславливают необходимость применения современных методов анализа состояния строительных конструкций шахт. В статье рассматривается применение стохастических моделей для прогнозирования и оценки состояния конструкций угольных шахт. Описаны основные методы построения стохастических моделей, приведены примеры их использования для оценки рисков разрушения, долговечности и надежности конструкций.

I.N. Garkin, L.V. Levitskaya, D.S. Kremnev, M.A.Vorobyov
USING STOCHASTIC MODELS IN ANALYSING THE STATE OF COAL MINES STRUCTURES

Keywords: industrial safety, coal mines, stochastic models, risk analysis, probabilistic modeling, emergency events, incidents, accident statistics.

In modern conditions of coal mine operation, the issues of ensuring safety and stability of structures acquire special significance. The variety of acting loads, complex geological and technical conditions, the presence of random factors determine the need to use modern methods for analyzing the state of mine building structures. The article discusses the use of stochastic models for predicting and assessing the state of coal mine structures. The main methods for constructing stochastic models are described, examples of their use for assessing the risks of destruction, durability and reliability of structures are given.

И.А. Гарькина, Л.Ш. Ахтямова, Л.И. Киямова, Ф.Ф. Фазыльзянов
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ

Ключевые слова: математическое моделирование, динамические системы, процессы деградации материалов, объекты культурного наследия, консервация.

Предлагается математическая модель процессов деградации материалов объектов культурного наследия. Приводится система дифференциальных уравнений, описывающая взаимодействие факторов разрушения; проводится анализ устойчивости критических точек. Даются аналитические выражения для динамики деградации; рассматриваются оптимальные стратегии консервации объектов.

I.A. Garkina, L.Sh. Akhtyamova, L.I. Kiyamova, F.F. Fazylzyanov
MATHEMATICAL MODELING OF DEGRADATION PROCESSES

Keywords: mathematical modeling, dynamic systems, material degradation processes, cultural heritage objects, conservation.

A mathematical model of degradation processes of cultural heritage objects is proposed. A system of differential equations is given that describes the interaction of destruction factors; an analysis of the stability of critical points is carried out. Analytical expressions for degradation rates are given; optimal conservation strategies of objects are considered.

Д.А. Киряков, Н.М. Труфанова
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В БУРОВОЙ СКВАЖИНЕ

Ключевые слова: буровая скважина, тепломассоперенос, буровой раствор, математическая модель, ANSYS FLUENT.

Бурение в высокотемпературных породах связано с риском перегрева инструментов, что требует точного прогнозирования тепловых режимов. Существующие модели часто не учитывают взаимное влияние температуры и теплофизических свойств породы, а также реальную структуру буровой колонны. Цель работы — разработка математической модели тепломассопереноса в стволе скважины с учётом этих факторов. Модель основана на законах сохранения и реализована с помощью метода конечных элементов в ANSYS. Разработанная математическая модель позволяет анализировать тепломассоперенос течения бурового раствора. В результате были получены температурные поля для прямого и обратного потоков, что важно для оптимизации режимов бурения и предотвращения тепловых повреждений оборудования.

D.A. Kiryakov, N.M. Trufanova
MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN A BOREHOLE

Keywords: borehole, heat and mass transfer, drilling fluid, mathematical model, ANSYS FLUENT.

Drilling in high-temperature rocks is associated with the risk of overheating of tools, which requires accurate prediction of thermal conditions. Existing models often do not take into account the mutual influence of temperature and thermophysical properties of the rock, as well as the actual structure of the drilling column. The aim of the work is to develop a mathematical model of heat and mass transfer in the borehole, taking into account these factors. The model is based on conservation laws and implemented using the finite element method in ANSYS. The developed mathematical model makes it possible to analyze the heat and mass transfer of the drilling fluid flow. As a result, temperature fields for forward and reverse flows were obtained, which is important for optimizing drilling modes and preventing thermal damage to equipment.

Л.М. Ковальчук, А.А. Комлев, Т.В. Бурнышева, Н.В. Пустовой
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОДБОРА ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕБЕРНОЙ СТРУКТУРЫ АНИЗОГРИДНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Ключевые слова: язык Python 3.11, ANSYS, напряженно –

L.M. Kovalchuk, A.A. Komlev, T.V. Burnysheva, N.V. Pustovoy
AUTOMATING THE SELECTION OF PARAMETER VALUES FOR THE RIB STRUCTURE OF AN ANISOGRID STRUCTURE

деформированное состояние, устойчивость конструкции, жесткость конструкции.

Представлен программный модуль, разработанный на языке Python 3.11, который взаимодействует с комплексом ANSYS. Модуль предназначен для подбора реберной структуры анизогридных оболочек при рациональном проектировании и расчете напряженно – деформированного состояния конструкций, их устойчивости и жесткости.

Keywords: Python 3.11 language, ANSYS, stress-strain state, structural stability, structural rigidity.

A software module developed in Python 3.11 is presented, which interacts with the ANSYS complex. The module is designed to select the rib structure of anisogrid shells in the rational design and calculation of the stress– strain state of structures, their stability and rigidity.

А.А. Корелин

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СТЕПЕНЬ СШИВКИ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Ключевые слова: математическая модель, степень сшивки, полиэтиленовая изоляция.

В работе представлена пространственная математическая модель процесса тепломассопереноса при вулканизации полиэтиленовой изоляции. В результате численной реализации модели методом конечных объемов получены поля температур, скоростей и степени сшивки изоляции при её прохождении в трубе вулканизации. Проведена оценка влияния предварительного нагрева токопроводящей жилы на распределение температуры и степени сшивки в готовой изолированной жиле.

A.A. Korelin

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON THE DEGREE OF CROSSLINKING OF POLYMER INSULATION

Keywords: mathematical model, degree of crosslinking, polyethylene insulation

The paper presents a spatial mathematical model of the heat and mass transfer process during vulcanization of polyethylene insulation. As a result of numerical implementation of the model by the finite volume method, fields of temperatures, velocities, and degree of crosslinking of insulation during its passage in the vulcanization tube are obtained. The influence of preheating of a conductive core on the temperature distribution and degree of crosslinking in the finished insulated core has been evaluated.

Ку Дык Тоан, Нгуен Минь Хиеу, Д.А. Ахметшин, Н.К. Нуриев, Е.А. Печеный, Нгуен Ван Тхинь, До Као Минь

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА ДЛЯ РАСЧЁТА ЗОН ПОКРЫТИЯ WI-FI С УЧЁТОМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПРЕПЯТСТВИЙ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

Ключевые слова: математическая модель, алгоритм, радиосигнал, Wi-Fi, препятствия.

В статье предложены математическая модель и алгоритм для расчёта зон покрытия Wi-Fi с учётом препятствий, таких как затухание сигнала и многолучевое распространение. Модель позволяет прогнозировать уровень сигнала и улучшать размещение точек доступа.

Cu Duc Toan, Nguyen Minh Hieu, D.A. Akhmetshin, H.K. Нуриев, E.A. Pechenyy, Nguyen Van Thinh, Do Cao Minh

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL AND ALGORITHM FOR CALCULATING WI-FI COVERAGE AREAS TAKING INTO ACCOUNT VARIOUS TYPES OF INDOOR OBSTACLES

Keywords: mathematical model, radio signal, Wi-Fi, algorithm, obstacles.

The article proposes a mathematical model and algorithm for calculating Wi-Fi coverage areas taking into account obstacles such as signal attenuation and multipath propagation. The model allows predicting the signal level and improving the placement of access points.

С.Н. Матвеев, А.П. Дровосеков, К.А. Сорокин, П.В. Прокопчук

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АНАЛОГА МОДЕЛИ КЭЛИ-КЛЕЙНА НА КОНЕЧНОМ ПОЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ C#

Ключевые слова: поле Галуа, математический объект, проективная плоскость, объектно-ориентированный язык программирования, модель Кэли-Клейна.

В работе описывается процесс разработки программы, позволяющей производить вычисления в автоматическом режиме мест элементов в таблице полей Галуа и порожденных ими конечных проективных пространств. Моделируются элементы аналога модели Кэли-Клейна плоскости Лобачевского на проективной плоскости с конечным числом точек с разработкой автоматизации вычислений на языке программирования C#.

S.N. Matveev, A.P. Drovosekov, K.A. Sorokin, P.V. Prokopchuk

INTERPRETATION OF THE FINITE FIELD ANALOGUE OF THE CAYLEY-KLEIN MODEL USING THE C# PROGRAMMING LANGUAGE

Keywords: Galois field, mathematical object, projective plane, object-oriented programming language, Cayley-Klein model.

The paper describes the process of developing a program that allows for automatic calculations of the locations of elements in the Galois field table and the finite projective spaces generated by them. Elements of the analogue of the Cayley-Klein model of the Lobachevsky plane on a projective plane with a finite number of points are modeled with the development of automation of calculations in the C# programming language.

С.Л. Моругин

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОНТУРА ПО СВОЙСТВАМ СЕМЕЙСТВА КРИВЫХ

Ключевые слова: контурный анализ, компьютерное зрение, семейство кривых, сингулярное разложение.

Цель исследования – рассмотреть адаптивный фильтр, который позволит уменьшить погрешность при восстановлении кривых из заранее заданного семейства и определить выбор порядка фильтра, оценить достижимую точность восстановления кривых семейства. Показано, что использование главных компонент, выделяемых путем сингулярного разложения из матрицы, задающей семейство кривых, позволяет в несколько раз уменьшить погрешность

S.L. Morugin

CONTOUR RECONSTRUCTION BASED ON THE PROPERTIES OF A FAMILY OF CURVES

Keywords: contour analysis, computer vision, family of curves, singular decomposition.

The purpose of the study is to consider an adaptive filter that will allow to reduce the error in the reconstruction of curves from a predetermined family and to determine the choice of the filter order, the learning process and the achievable accuracy of the reconstruction of the family curves. It is shown that the use of the principal components, allocated by singular decomposition from the matrix, which defines the family of curves, allows to reduce the error of the contour

восстановления контура плоского изображения по сравнению со сглаживающими фильтрами, использующие локальные области кривых для сглаживания. Адаптивный фильтр может быть использован в системах компьютерного зрения при распознавании изображений по контурам, при решении задач увеличения масштаба изображения с сохранением качества контуров.

restoration of a flat image several times in comparison with smoothing filters, which use local areas of curves for smoothing. Adaptive filter can be used in computer vision systems for image recognition by contours, for solving problems of increasing the scale of the image while preserving the quality of the contours.

А.Д. Плужников, Л.В. Когтева, Е.А. Маврычев, Е.Н. Приблудова, С.Б. Сидоров, Е.Г. Чужайкин

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ АМПЛИТУДНЫХ ФЛЮКТУАЦИЙ ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ПЕРЕИЗЛУЧЕННЫХ ВОЗДУШНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Ключевые слова: радиолокационные сигналы, амплитудные флюктуации, обработка сигналов.

Описана методика моделирования амплитудных флюктуаций для импульсных радиолокационных сигналов. В общем случае флюктуации полагаются коррелированными. Корреляционные свойства флюктуаций обеспечиваются моделированием цифровой рекурсивной фильтрации.

A.D. Pluzhnikov, L.V. Kogteva, E.A. Mavrychev, E.N. Pribludova, S.B. Sidorov, E.G. Chuzhaykin

METHOD OF AMPLITUDE FLUCTUATIONS MODELING FOR RADAR SIGNALS RE-RADED BY AIR OBJECTS

Keywords: radar signals, amplitude fluctuations, signal processing.

A method of amplitude fluctuations modeling for pulsed radar signals described. In general, fluctuations are assumed to be correlated. The correlation properties of fluctuations are provided by modeling of digital recursive filtering.

Д.Е. Решетников, А.Н. Кожевников, К.А. Матвеев, Н.В. Пустовой

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ТРОСОВ

Ключевые слова: упругий трос, спектр частот собственных колебаний, модель струны, анализатор частот «ЛЭПТОН-1», алгоритмизация.

Представлены этапы разработки автоматизированного подхода к обработке экспериментально определенных частот собственных колебаний. Указанный подход основан на применении расчетной модели струны как схематизации упругого троса с относительно большим уровнем тяжения. Предложенный алгоритм может быть реализован на любом языке программирования.

D.E. Reshentikov, A.N. Kozhevnikov, K.A. Matveev, N.V. Pustovoy

THE ALGORITHM OF ELASTIC ROD EIGENVALUES IDENTIFICATION

Keywords: elastic rod, eigenvalues, string model, spectrum analyzer "LEPTON-1", alghoritm.

The stages of development of an automated approach to processing experimentally determined frequencies of eigenvalues are presented. The specified approach is based on the usage of a string mathematical model as a schematization of an elastic cable with a relatively high level of tension. The proposed algorithm can be implemented in any programming language.

А.А. Решетов, Г.А. Гулий

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ СЛУЧАЙНОМ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С НЕСТАЦИОНАРНЫМ СПЕКТРАЛЬНЫМ СОСТАВОМ

Ключевые слова: сейсмическое воздействие, нестационарный спектр, генерирование акселерограммы, оценка надёжности, метод статистических испытаний.

В работе представлена методика моделирования сейсмического воздействия, как нестационарного случайного процесса. Сейсмическое ускорение задаётся как произведение огибающей, описывающей временную эволюцию уровня воздействия, и квазистационарного случайного процесса, имеющего переменный во времени спектральный состав. Генерирование квазистационарного случайного процесса основано на взвешенном преобразовании Фурье. В работе показано, что учёт нестационарности спектра сейсмического воздействия может существенно изменять динамический отклик систем. В заключительной части выполнен расчёт на надежность здания методом статистических испытаний: была сформирована составная функция работоспособности, синтезирован набор акселерограмм и произведено 50 испытаний, что позволило оценить вероятность отказа здания. Предложенные методики обеспечивают более точную и реалистичную оценку сейсмической безопасности современных зданий и сооружений.

A.A. Reshetov, G.A. Guliy

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF BUILDINGS AND STRUCTURES UNDER RANDOM SEISMIC LOADING WITH NON-STATIONARY SPECTRAL CONTENT

Keywords: *seismic excitation; non-stationary spectrum; accelerogram generation; reliability assessment; statistical simulation method.*

This paper presents a methodology for modeling seismic excitation as a non-stationary random process. Seismic acceleration is represented as the product of an envelope function—describing the temporal evolution of the excitation level—and a quasi-stationary random process with time-varying spectral content. The generation of the quasi-stationary process is based on a weighted Fourier transform. It is shown that accounting for spectral non-stationarity can markedly alter a system's dynamic response. In the final section, a reliability analysis of a building is performed using the statistical simulation method: a composite operability function is defined, a suite of accelerograms is synthesized, and 50 simulations are carried out, enabling an estimate of the building's probability of failure. The proposed methods provide a more accurate and realistic assessment of the seismic safety of modern buildings and structures.

Е.И. Романенко, И.А. Банщикова, Н.В. Пустовой, Ю.С. Селиванов

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РЕАКЦИИ ОПОР В ANSYS

Ключевые слова: разрушающая нагрузка, виртуальный эксперимент, метод конечных элементов, нелинейный анализ, ANSYS APDL.

E.I. Romanenko, I.A. Banshchikova, N.V. Pustovoy, Y.S. Selivanov

AUTOMATED ALGORITHM FOR DETERMINING THE ULTIMATE LOAD OF STRUCTURES BASED ON SUPPORT REACTION ANALYSIS IN ANSYS

Keywords: ultimate breaking load, virtual experiment, finite element method, nonlinear analysis, ANSYS APDL.

An algorithm for automatic determination of destructive load

Предложен алгоритм автоматического определения разрушающей нагрузки конструкций в среде ANSYS. Метод основан на анализе реакции опор при приложении управляемого перемещения с адаптивным шагом. Разработанный APDL-макрос реализует критерий остановки расчета при достижении максимума реакции. Валидация на образцах в виде проушин из алюминиевого сплава Д16Т показала расхождение с экспериментами 1-7%. Алгоритм сокращает время оценки несущей способности и устраняет субъективизм ручного анализа.

of structures in ANSYS environment is proposed. The method is based on the analysis of the reaction of supports when a controlled displacement with adaptive step is applied. The developed APDL macro implements the criterion of stopping the calculation when the maximum reaction is reached. Validation on samples in the form of eyelets made of aluminum alloy D16T showed a discrepancy with experiments of 1-7%. The algorithm reduces the time of bearing capacity estimation and eliminates the subjectivism of manual analysis.

Ю.С. Селиванов, К.А. Матвеев, Е.И. Романенко

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Ключевые слова: метод конечных элементов, топологическая оптимизация, нейронные сети.

Существует достаточно много методов и подходов к топологической оптимизации в области механики деформируемого твердого тела, ставшие уже классическими. В настоящее время активной развивается возможность применения нейронных сетей в разных областях, в том числе и в задачах механики. В работе представлен алгоритм применения нейронных сетей к задаче топологической оптимизации как бессеточный подход.

Y.S. Selivanov, K.A. Matveev, E.I. Romanenko

SOLVING THE PROBLEM OF TOPOLOGICAL OPTIMIZATION USING NEURAL NETWORKS

Keywords: finite element method, topological optimization, neural networks.

There are quite a few methods and approaches to topological optimization in the field of deformable solid mechanics that have already become classical. Currently, the possibility of using neural networks in various fields, including in problems of mechanics, is actively developing. The paper presents an algorithm for applying neural networks to the problem of topological optimization as a mesh free approach.

Р.З. Хайруллин

К ПОСТРОЕНИЮ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПРЕДЕЛЯЮЩЕГО ПАРАМЕТРА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА РАННИХ ЭТАПАХ РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ

Ключевые слова: вариационный принцип, определяющий параметр, функция плотности распределения, многокомпонентная техническая система.

Предложена технология применения вариационного принципа максимума энтропии на ранних этапах разработки и испытаний многокомпонентных технических систем с целью построения функции распределения определяющего параметра. Представлены результаты ее применения.

R.Z. Khayrullin

ON THE CONSTRUCTION OF THE DISTRIBUTION LAW OF THE KEY PARAMETER OF MULTICOMPONENT TECHNICAL SYSTEMS AT THE EARLY STAGES OF DEVELOPMENT AND TESTING

Keywords: variational principle, determining parameter, distribution density function, multicomponent complex technical system.

The technology of applying the variational principle at the early stages of development and testing of multicomponent technical systems with the purpose of constructing the distribution density function of its determining parameter is suggested. Results of application of the technology are presented.

Е.Г. Царькова, Ю.В. Чемарина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РЕЦИДИВНОЙ ПРЕСТУПНОСТИ

Ключевые слова: уголовно-исполнительная система Российской Федерации, рецидивная преступность, криминогенная остановка, оптимальное управление, система массового обслуживания.

В работе приводится формализация задачи управления ресурсами при реализации мероприятий по снижению повторной (рецидивной) преступности среди лиц, ранее отбывавших наказания за совершенные правонарушения. Рассматриваемый процесс сведен к решению задачи оптимального управления. Получены соотношения, описывающие динамику состояний системы, построены частные численные решения.

E.G. Tsarkova, Y.V. Chemarina

MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMICS RECIDIVISM

Keywords: Penal System of the Russian Federation, recidivism crime, criminogenic stop, optimal control, mass service system.

The paper formalizes the task of resource management in the implementation of measures to reduce repeat (recidivism) among people who have previously served sentences for committed offenses. The process under consideration is reduced to solving the optimal control problem. Relations describing the dynamics of the system states are obtained, and partial numerical solutions are constructed.

К.О.Чичиров, Л.Ш. Ахтямова,
Л.И. Киямова, М.А.Закирова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ (КРИВОЙ ХАРРИНГТОНА) ПРИ ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ НА ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ

Ключевые слова: система вентиляции, энергетика, функция желательности, кривая Харрингтона, оценка работоспособности, эксплуатационные параметры.

Анализируется возможности применения функции желательности (кривой Харрингтона) для комплексной оценки работоспособности систем вентиляции на объектах энергетики. Приводится обоснование выбора метода, рассмотрены основные этапы формирования индекса

K.O. Chichirov, L.Sh. Akhtyamova,
L.I. Kiyamova, M.A. Zakirova

USING THE DESIRABILITY FUNCTION (HARRINGTON CURVE) TO ASSESS THE PERFORMANCE OF VENTILATION SYSTEMS AT POWER SECTORS

Keywords: ventilation system, energy, desirability function, Harrington curve, performance assessment, operating parameters.

The article analyzes the possibilities of using the desirability function (Harrington curve) to comprehensively assess the performance of ventilation systems at power engineering facilities. The rationale for the choice of method is provided, and the main stages of forming the desirability index based

желательности по эксплуатационным параметрам. Описан пример вычисления на основе реальных показателей работы вентиляционного оборудования. Обсуждаются перспективы внедрения метода для повышения надежности и эффективности эксплуатации энергетических объектов.

М.Ю. Шрейдер, А.Д. Тарасов,
Р.Д. Сулейменова, Д.В. Левченко
МЕТОД ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ГРАФОВОЙ МОДЕЛИ

Ключевые слова: система физической защиты, алгоритм Дейкстры, графовая модель.

Представлен метод для оценки защищенности участков объекта системой физической защиты по критерию, характеризующему невозможность для нарушителя проникнуть на территорию объекта и добраться до цели. Используется адаптированный алгоритм Дейкстры для поиска всех возможных маршрутов перемещения нарушителя по территории объекта. Оценивается вероятность несанкционированного проникновения при выборе нарушителем самого слабо защищенного маршрута.

A.M. Авербух
РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ АЛГОРИТМА INCREMENTAL LAZY THETA* ДЛЯ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Ключевые слова: автономная навигация, частично известная карта, динамическая среда, алгоритм поиска пути, инкрементальный Lazy Theta.*

В статье рассматривается задача построения траектории движения мобильного агента в условиях частично известной и динамически изменяющейся среды. Предлагается алгоритм incremental Lazy Theta (iLT*), сочетающий преимущества алгоритмов Theta* (построение маршрутов произвольной направленности) и D*-Lite (инкрементальное обновление пути при изменении карты). Результаты демонстрируют сбалансированные показатели iLT* по таким метрикам, как длина пути, кривизна траектории и среднее время реакции.*

М.А. Балакин, А.Н. Гнатюк
ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОЙ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ НА ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ ДЕВЕЛОПЕРСКОГО ПРОЕКТА

Ключевые слова: урбанизированная территория, девелоперский проект, качественные оценка, внутренние и внешние факторы, нечеткое моделирование.

Представлена системная методика качественной оценки свойств урбанизированных территорий (участков) на этапе разработки идей девелоперского проекта. Методика включает определение состава оценочных факторов рассматриваемого участка и влияние внешних факторов, а также формирование интегральных оценок. Предложено для создания системы поддержки принятия решений применять методы нисходящего искусственного интеллекта в виде нечеткого моделирования.

П.П. Вепрева, О.П. Тимофеева
РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Ключевые слова: интерферометр, DATX, XYZ, Nan, RMS, PV, график, фильтр, Python, json.

В статье описывается создание программного обеспечения, используемого для преобразования полученных от интерферометра данных – результатов измерения оптической поверхности. Разработка программного обеспечения, приводящего данные, полученные с интерферометра, к единому

on operational parameters are considered. An example of calculation based on actual performance indicators of ventilation equipment is described. The prospects for implementing the method to improve the reliability and efficiency of operation of energy facilities are discussed.

M.Yu. Shreyder , A.D. Tarasov,
R.D. Suleymenova, D.V. Levchenko
METHOD FOR ASSESSING THE STRUCTURAL SECURITY OF AN OBJECT USING A GRAPH MODEL

Keywords: Keywords: physical protection system, Dijkstra's algorithm, graph model.

A method is presented for assessing object sections protection by a physical protection system according to a criterion characterizing the impossibility for an intruder to penetrate object territory and reach the target. Adapted Dijkstra algorithm is used to search for all intruder possible routes to move around object territory. The probability of unauthorized entry is estimated when the intruder chooses the most poorly protected route.

A.M. Averbukh
DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF THE INCREMENTAL LAZY THETA ALGORITHM FOR AUTONOMOUS NAVIGATION IN DYNAMIC ENVIRONMENTS

Keywords: autonomous navigation, partially known map, dynamic environment, path planning algorithm, incremental Lazy Theta.*

This paper addresses the problem of trajectory planning for a mobile agent in a partially known and dynamically changing environment. An incremental Lazy Theta (iLT*) algorithm is proposed, which combines the advantages of the Theta* algorithm (construction of any-angle paths) and D*-Lite (incremental path replanning in response to environmental changes). The results demonstrate the balanced performance of iLT* across key metrics such as path length, trajectory curvature, and average response time.*

M.A. Balakin, A.N. Gnatyuk
APPLICATION OF A SYSTEMATIC METHODOLOGY FOR ASSESSING THE PROPERTIES OF AN URBANIZED AREA AT THE INITIAL STAGES OF A DEVELOPMENT PROJECT

Keywords: urbanized territory, development project, qualitative assessment, internal and external factors, fuzzy modeling.

A systematic methodology for the qualitative assessment of the properties of urbanized territories (plots) at the stage of developing ideas for a development project is presented. The methodology includes the determination of the composition of the evaluation factors of the site under consideration and the influence of external factors, the formation of integral estimates. It is proposed to apply top-down artificial intelligence methods in the form of fuzzy modeling to create a decision support system.

P.P. Vepreva, O.P. Timofeeva
DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF SOFTWARE APPLICATION FOR PROCESSING INTERFEROMETER RESULTS

Keywords: interferometer, DATX, XYZ, Nan, RMS, PV, graph, filter, Python, json.

The article describes the creation of software used to convert data obtained from an interferometer, which is the result of measuring the optical surface. The development of software that converts data obtained from an interferometer into a unified format and allows for its subsequent processing is an

формату и позволяющего проводить их последующую обработку, является актуальной практически значимой задачей. Программное обеспечение позволяет автоматизировать обработку данных и имеет возможность сохранять результаты, тем самым оптимизируя рабочий процесс.

important and practical task. The software allows for the automation of data processing and the ability to save results, thereby optimizing the workflow.

И.Ю. Гапицонов, А.Г. Жихарев,
Е.К. Кабанов, А.В. Кузнецов, А.А. Дрога
МЕТОД СИСТЕМНО-ОБЪЕКТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЕКТОВ КОМЛПЕКСНОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИИ

Ключевые слова: сложная система, управление проектом, системно-объектная модель, системный подход.

В работе рассматривается новый метод системно-объектного моделирования проектов комплексного развития территории, который позволяет сформировать необходимое информационно-аналитическое обеспечение процедур управления такими проектами. В работе применяется теория системно-объектного моделирования сложных систем, на основе которой предложен новый способ формализованного представления проекта комплексного развития территории, учитывающий стоимостные и временные параметры. Разработанный метод позволяет прогнозировать процесс реализации и управление вышеупомянутыми проектами.

I.Yu. Gapitstonov, A.G. Zhikharev,
E.K. Kabanov, A.V. Kuznetsov, A.A. Droga
SYSTEM-OBJECT MODELING METHOD FOR INTEGRATED TERRITORY DEVELOPMENT PROJECTS

Keywords: complex system, project management, system-object model, systems approach.

This paper presents a novel system-object modeling method for integrated territory development projects. The method enables the formation of essential information and analytical support for managing such projects. Leveraging the theory of system-object modeling for complex systems, the work proposes a new formalized approach to representing integrated territory development projects that accounts for cost and time parameters. The developed method facilitates the forecasting of implementation processes and management for the aforementioned projects.

К.Е. Долженко, А.В. Кожина, Д.Р. Новиков, В.Р. Козлов
АЛГОРИТМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Ключевые слова: алгоритм, дифференциальная эволюция, методы оптимизации, машинное обучение, эффективность.

В данной работе приведены результаты решений задач машинного обучения с использованием алгоритма дифференциальной эволюции для настройки гиперпараметров. Исследования эффективности реализованных решений производились на типичных для тестирования наборах данных с различной структурой и сложностью. Проведенные эксперименты показали перспективность использования алгоритма дифференциальной эволюции в области машинного обучения и возможности для дальнейших исследований.

K.E. Dolzhenko, A.V. Kozhina, D.R. Novikov, V.R. Kozlov
DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM FOR SOLVING MACHINE LEARNING TASKS

Keywords: algorithm, differential evolution, optimization methods, machine learning, efficiency.

This paper presents improvements to machine learning solutions. Improvements to the solutions are based on hyperparameter tuning using the differential evolution algorithm. Studies of the effectiveness of implemented solutions were carried out on standard test datasets with different structures and complexity. The experiments conducted have shown the promise of using the differential evolution algorithm in the field of machine learning and the possibilities for further research.

Д.С. Карпович, Л.Э. Петросян
ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ КОНТИНГЕНТА ОБУЧАЮЩИХСЯ В ВУЗАХ

Ключевые слова: динамика контингента, отток студентов, сохранность обучающихся, системный анализ, управление образованием, статистическое моделирование.

Динамика движения контингента обучающихся (студентов, магистрантов, аспирантов) является важным индикатором эффективности образовательной системы, отражающим потери и сохранность кадров в процессе обучения. В статье проводится системный анализ факторов, влияющих на отток и удержание обучающихся в техническом вузе, включая академическую успеваемость, социально-экономические условия и адаптационные механизмы. Особое внимание уделяется методам статистического моделирования и анализу данных для прогнозирования и снижения оттока. Рассматривается пример применения цифровых инструментов мониторинга для повышения сохранности контингента.

D.S. Karpovich, L.E. Petrosyan
STUDENT ENROLLMENT DYNAMICS

Keywords: student population dynamics, student attrition, retention rate, system analysis, education management, statistical modeling.

The dynamics of the student population (undergraduates, master's, and PhD students) is a key indicator of the effectiveness of an educational system, reflecting attrition and retention rates during the learning process. This article presents a systemic analysis of factors affecting student dropout and retention in a technical university, including academic performance, socio-economic conditions, and adaptation mechanisms. Special attention is paid to statistical modeling and data analysis methods for predicting and reducing attrition. A case study of digital monitoring tools for improving student retention is discussed.

О.А. Кашинцева, А.В. Мясных
РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ МНОГОЗНАЧНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОПЕРАТИВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА И ЗАМЕНЫ КЛАССОВ

Ключевые слова: многозначная классификация, нейронные сети, интеллектуальная система, средства индивидуальной защиты.

Использование многозначной классификации в интеллектуальных системах позволяет определять наличие нескольких классов на одном изображении, однако ее применение сопряжено с рядом проблем: 1) при добавлении или удалении нового класса в систему возникает необходимость

O.A. Kashintseva, A.V. Myasnykh
DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE OF A MULTI-LABEL CLASSIFICATION SYSTEM WITH THE POSSIBILITY OF OPERATIVELY CHANGING THE NUMBER AND REPLACING CLASSES

Keywords: multi-label classification, neural networks, intelligent system, personal protective equipment.

The use of multi-label classification in intelligent systems allows one to determine the presence of several classes in one image, but its use is associated with a number of problems: 1) when adding or deleting a new class to the

правки всего набора данных; 2) при построении одной универсальной модели с большим количеством классов для решения задач разной тематики увеличивается стоимость и время реализации будущих проектов. В статье предлагается подход к построению системы для решения задачи многозначной классификации, не имеющий данных проблем. Описан прототип интеллектуальной системы для определения наличия средств индивидуальной защиты (СИЗ) на работниках предприятий, демонстрирующий эффективность метода.

system, it is necessary to edit the entire data set; 2) when building one universal model with a large number of classes to solve problems of different topics, the cost and time of implementation of future projects increases. The article proposes an approach to building a system for solving the problem of multi-label classification that does not have these problems. A prototype of an intelligent system for determining the presence of personal protective equipment (PPE) on employees of enterprises is described, demonstrating the effectiveness of the method.

А.В. Кожина, Д.Р. Новиков,
К.Е. Долженко, В.Д. Хашин
ИНТЕГРАЦИЯ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ЮРИДИЧЕСКИЕ ЧАТ-БОТЫ: ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ

Ключевые слова: большие языковые модели, интеллектуальные агенты, QLoRA, юридический чат-бот, дообучение, человеко-машинный интерфейс.

В статье рассматривается задача интеграции больших языковых моделей в человеко-машинные интерфейсы для юридического консультирования. Исследованы методы параметр-эффективного дообучения моделей с применением технологий QLoRA. Представлены результаты сравнительного анализа моделей LLaMA-3.1-8B-Instruct и Qwen-2.5-14B-Instruct, обученных на корпусе юридических вопросов. Произведена интеграция лучшей модели в Telegram-бота.

A.V. Kozhina, D.R. Novikov,
K.E. Dolzhenko, V.D. Khashin
INTEGRATION OF LARGE LANGUAGE MODELS INTO LEGAL CHATBOTS: RESEARCH AND IMPLEMENTATION

Keywords: large language models, intelligent agents, QLoRA, legal chatbot, fine-tuning, and human-machine interface.

The article discusses the task of integrating large language models into human-machine interfaces for legal consulting. It explores the methods of parameter-efficient training of models using Lora technologies. The article presents the results of a comparative analysis of the Lama-3.1-8B-Instruct and Qween-2.5-14B-Instruct models trained on a legal question corpus. The article also demonstrates the integration of the best model into a Telegram bot.

В.Р. Козлов, А.В. Кожина, Д.Р. Новиков,
К.Е. Долженко, В.Д. Хашин
ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫЕ РЕШЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Ключевые слова: чувствительные данные, дерево решений, случайный лес, LIME, интерпретация решений.

В работе исследованы интерпретируемые способы обнаружения аномалий в чувствительных данных. Рассмотрены два подхода: применение дерева решений и комбинация случайного леса с методом LIME. Эксперименты выполнены на реальных данных ЭКГ и транзакций по кредитным картам. Подходы показали высокую эффективность и возможность объяснения результатов для работы с чувствительными данными.

V.R. Kozlov, A.V. Kozhina, D.R. Novikov,
K.E. Dolzhenko, V.D. Khashin
INTERPRETED SOLUTIONS IN MACHINE LEARNING TASKS WITH SENSITIVE DATA

Keywords: sensitive data, decision tree, random forest, LIME, decisions interpretation.

The study explores interpretable methods for anomaly detection in sensitive data. Two approaches were examined: the use of decision trees and a combination of random forest with the LIME method. Experiments were conducted on real-world ECG and credit card transaction datasets. Both approaches demonstrated high effectiveness and provided explainable results suitable for working with sensitive information.

В.Р. Козлов, А.В. Кожина, Д.Р. Новиков, В.Д. Хашин
ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОБУЧЕНИЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, стохастический градиентный спуск, дифференциальная эволюция, машинное обучение с учителем.

В работе рассматривается обучение искусственной нейронной сети эволюционным алгоритмом – дифференциальной эволюцией. Проводится сравнительный анализ дифференциальной эволюции и традиционного метода стохастического градиентного спуска. Анализ осуществляется на синтетических и реальных задачах машинного обучения с учителем.

V.R. Kozlov, A.V. Kozhina, D.R. Novikov, V.D. Khashin
AN EVOLUTIONARY APPROACH FOR TRAINING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Keywords: artificial neural networks, stochastic gradient descent, differential evolution, supervised machine learning.

The paper explores the training of an artificial neural network using an evolutionary algorithm known as differential evolution. It also compares the performance of differential evolution with the traditional stochastic gradient descent method. The study evaluates both approaches on synthetic and real-world supervised machine learning tasks.

В.Р. Козлов, Е.А. Сопов
СИНТЕЗ КОЛЛЕКТИВОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, дифференциальная эволюция, машинное обучение с учителем, мультимодальность, ансамбли.

В данной работе рассматривается синтез ансамблей искусственных нейронных сетей различной архитектуры. Выполнен сравнительный анализ двух подходов к построению моделей: дифференциальной эволюции и использования разных видов коллективов нейронных сетей. Оценка эффективности проведена на синтетических и реальных задачах машинного обучения с учителем.

V.R. Kozlov, E.A. Sopov
SYNTHESIS OF NEURAL NETWORK TEAMS BASED ON THE DIFFERENTIAL EVOLUTION ALGORITHM

Keywords: artificial neural networks, differential evolution, supervised machine learning tasks, multimodality, ensembles.

The paper investigates the synthesis of ensembles composed of artificial neural networks with different architectures. A comparative analysis is conducted between two model-building approaches: differential evolution and the use of neural network ensembles. The effectiveness of these methods is evaluated on both synthetic and real-world supervised machine learning tasks.

Н.М. Кудрявцев, Е.А. Сопов

РАЗРАБОТКА ВЕБ-СЕРВИСА ДЛЯ СБОРА И АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ

Ключевые слова: сбор данных, парсинг, веб-скрейпинг, мониторинг цен, электронная коммерция, Puppeteer.js, анализ трендов.

В работе представлены результаты разработанного сервиса для автоматизированного сбора данных с маркетплейсов «Ozon» и «Эльдорадо». Сервис обеспечивает мониторинг изменения цен товаров и визуализацию этих данных через веб-интерфейс сервиса. Описан алгоритм сбора и актуализации информации о товарах, включая методы обработки изменений структуры веб-страниц. Готовое решение позволяет экспортировать данные в форматах CSV, XML и PDF.

N.M. Kudryavtsev, E.A. Sopov

DEVELOPMENT OF A WEB SERVICE FOR DATA COLLECTION AND ANALYSIS FOR E-COMMERCE SYSTEMS

Keywords: data collection, parsing, web scraping, price monitoring, e-commerce, Puppeteer.js, trend analysis.

This article presents the results of developing a web service for automated data collection from Ozon and Eldorado marketplaces. The service provides price monitoring and data visualization via the service's web interface. The paper describes an algorithm for data collection and data update, including methods for handling dynamic website structures. The solution supports data export to CSV, XML, and PDF formats.

П.С. Кулясов, П.В. Мисевич

ТЕХНОЛОГИЯ ОТОБРАЖЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДИАГРАММЫ EPC В СТРУКТУРУ ДАННЫХ РЕЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Ключевые слова: модель бизнес-процесса, EPC, функция меры, фрейм, многомерная модель, модель снежинка.

Статья посвящена способу построения информационного обеспечения средств автоматизации бизнес-процесса, который представлен моделью в нотациях диаграммы EPC. Рассматривается модификация стандартной диаграммы EPC, к элементам которой можно добавлять значения функций мер и фреймы – инструмент описания ситуации в предметной области автоматизации. Описана логическая схема БД (реляционная модель – структура типа «снежинка»), которая является шаблоном информационного обеспечения, который адаптируется к конкретной диаграмме EPC. Описана технология отображения модели бизнес-процесса в систему таблиц предложенного шаблона. Рассматривается пример построения информационного обеспечения для модифицированной диаграммы EPC.

P.S. Kulyasov, P.V. Misevich

TECHNOLOGY FOR MAPPING MODIFIED EPC DIAGRAMS INTO THE LOGICAL SCHEME IN THE RELATIONAL DATABASE

Keywords: business process model, EPC, measure value, frame, multidimensional model, snowflake model.

The method of developing the information support for automation tools of business processes is described in the paper. A modification of the standard EPC diagram is considered, to the elements of which it is possible to add values of the functions of measures and frames – a tool for describing the situation in the subject area of automation. The logical schema (relational model – a "snowflake" type structure) is described too. The technology of mapping a business process model into a system of tables of the proposed template is described. The example of developing information support for the modified EPC diagram is described in the paper.

Л.С. Ломакина, И.Д. Чернобаев, А.Н. Двитовская, К.А. Корелин, Д.А. Белов

ПРОБЛЕМА УСКОРЕНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

Ключевые слова: диагностирование, состояние объекта, нейросетевое моделирование, ансамблевые методы машинного обучения.

В работе рассматривается проблема ускорения процесса принятия решений при диагностировании объектов различной физической природы в контексте задачи классификации состояний объектов. При прогнозировании категорий состояний применяются методы приближенного поиска решения. Искусственные нейронные сети позволяют получать прогнозы с высокой точностью, однако их применение требует объёмной и качественной обучающей выборки, а также длительного обучения. В этой связи для ускорения вычислений и повышения точности прогнозирования в работе рассматривается применение нейросетевые моделей в составе ансамблевых методов машинного обучения. В прикладных задачах классификации технических и медицинских объектов применение ансамблей нейросетевых моделей позволяет ускорить обучение и при этом повысить точность диагностирования на 4 - 6 %.

L.S. Lomakina, I.D. Chernobaev, A.N. Dvitovskaya, K.A. Korelin, D.A. Belov

THE PROBLEM OF SPEEDING UP CALCULATIONS IN APPLIED TASKS OF DIAGNOSING OBJECTS OF VARIOUS PHYSICAL NATURE

Keywords:diagnostics, object tate, neural network modeling, ensemble machine learning methods.

The paper considers the task of speeding up the decision-making process when diagnosing objects of various physical nature in the task of classifying the states of objects. When predicting categories of states, approximate solution search methods are used. Artificial neural networks allow to make predictions with high accuracy, but their usage requires certain volume of high-quality training samples, as well as long-term training. In this regard, to speed up calculations and improve the accuracy of prediction, the paper considers the use of neural network models as part of ensemble machine learning methods. In experimental classification of technical and medical objects, the use of ensembles of neural network models makes it possible to accelerate learning and at the same time increase diagnostic accuracy by 4-6%.

Т.И. Мариупольский, Е.В. Храпунова, И.А. Панфилов, М.Б. Хамраев, А.А. Оганисян

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ПОЖАРОВ

Ключевые слова: анализ данных, данные о пожарах, алгоритмы машинного обучения.

В статье описываются решения задач анализа данных на основе информации о природных и антропогенных пожарах. Рассматриваются гипотезы задач регрессионного анализа по

T.I. Mariupolskiy, E.V. Khrapunova, I.A. Panfilov, M.B. Khamraev, A.A. Oganisyan

SOLVING PROBLEMS OF INTELLIGENT ANALYSIS OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC FIRES

Keywords: data analysis, fire data, machine learning algorithms.

The article describes solutions to data analysis tasks based on information about natural and anthropogenic fires. The article considers the hypotheses of regression analysis tasks

определению величины ущерба от пожара, определения класса природного пожара, расчета количества пострадавших при пожаре. Разработаны модели машинного обучения для проверки гипотез.

Е.Е. Миргородская, Д.А. Васильев, О.В. Ушакова, А.Е. Черных, Н.П. Митяшин, Ю.Б. Томашевский
ФОРМИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОЛЛЕКТИВА В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА КАДРОВ

Ключевые слова: производственный коллектив, дефицит кадров, оптимизация.

В статье предложен алгоритм формирования производственного коллектива на основе компетентностного подхода в условиях, когда число сотрудников меньше числа функциональных позиций. Приведен пример решения конкретной задачи, иллюстрирующий применимость предложенной методики. Проведен анализ ограничения применения методики, связанного с несоответствием временных ресурсов сотрудников и требуемых затрат на выполнение функций позиций.

E.E. Mirgorodskaya, D.A. Vasiliev, O.V. Ushakova, A.E. Chernykh, N.P. Mityashin, Yu.B. Tomashevsky
FORMATION OF A PRODUCTION TEAM IN CONDITIONS OF STAFF SHORTAGE

Keywords: production team, staff shortage, optimization.

The paper proposes an algorithm for forming of a production team based on a competency-based approach in conditions, where the number of employees is less than the number of functional positions. An example of a specific problem solving, which illustrated the applicability of the proposed methodology, is given. An analysis of limitations of the methodology application, associated with the discrepancy between the time resources of employees and required costs of the realizing of positions functions, is made.

С.Л. Моругин
МОДЕЛЬ ДИАЛОГА С АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СЛУЖБОЙ ПОДДЕРЖКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОБЛЕМ КЛИЕНТОВ

Ключевые слова: автоматизированные службы поддержки, модель диалога, графы, семантические сети.

Предложена модель диалога службы автоматизированной поддержки клиентов, определяющая стратегию верхнего уровня поведения системы, которая может быть использована в формате сайтов, в чат ботах с ИИ, электронных обучающих и информационно-справочных системах. Основанная на сети в виде графа с мультивершинами модель диалога позволяет: задавать целевое поведение при случайных ответах клиента и соответствующих им случайных переходах в рамках проблемы; минимизировать цену достижения цели (количество и сложность вопросов, задаваемых клиенту, объем предоставляемой информации); решать задачи выбора вопросов и выдачи информации для клиентов разных категорий подготовленности на основе единой методики ведения диалога, основанной на минимизации расстояния до цели.

S.L. Morugin
MODEL OF DIALOGUE WITH AN AUTOMATED SUPPORT SERVICE FOR SOLVING CLIENT'S INFORMATION PROBLEMS

Keywords: automated support services, dialog model, graphs, semantic networks.

Proposed is a model of the automated customer support service dialogue, which defines the upper-level strategy of the system behavior, which can be used in the format of sites, in chat bots with AI, electronic training and information and reference systems. Based on a network in the form of a graph with multi-vertices, the dialog model allows you to: set the target behavior with random client responses and corresponding random transitions within the task; minimize the cost of achieving the goal (the number and complexity of questions asked to the client, the amount of information provided); solve the problems of selecting questions and providing information to clients with different levels of preparedness based on a unified dialogue methodology based on minimizing the distance to the goal.

Д.Р. Новиков, В.Р. Козлов, К.Е. Долженко, В.Д. Хашин
АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ В ЗАДАЧАХ БАНКОВСКОГО СКОРИНГА

Ключевые слова: дифференциальная эволюция, банковский скоринг, оптимизация, машинное обучение, классификация.

В работе исследуется применение методов дифференциальной эволюции (DE) для решения задачи банковского скоринга. Проведено сравнение эффективности классических схем DE (DE/rand/1, DE/rand/2, DE/current-to-best/1, DE/rand-to-best/1) и их адаптивных модификаций (JDE, SHADE) на тестовых функциях и реальных данных. Также проведен анализ важности признаков для оценки кредитоспособности клиентов.

D.R. Novikov, V.R. Kozlov, K.E. Dolzhenko, V.D. Khashin
ANALYSIS OF THE APPLICATION OF DIFFERENTIAL EVOLUTION IN CREDIT SCORING

Keywords: differential evolution, banking scoring, optimization, machine learning, and classification.

The paper studies the application of differential evolution (DE) methods to solve the problem of banking scoring. The paper compares the effectiveness of classical DE schemes (DE/rand/1, DE/rand/2, DE/current-to-best/1, DE/rand-to-best/1) and their adaptive modifications (JDE, SHADE) on test functions and real data. The paper also analyzes the importance of features for assessing customer creditworthiness.

А.В. Прописнова, П.Г. Михайлова
РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГРУЗОВ С ОПАСНЫМИ ХИМИЧЕСКИМИ ВЕЩЕСТВАМИ В УСЛОВИЯХ ВНЕДРЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПЕРЕВОЗОЧНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Ключевые слова: Государственная информационная система электронных перевозочных документов, электронный документооборот, электронная транспортная накладная, информационная система, опасные грузы.

В статье исследуется потребность в создании электронных транспортных документов в контексте разработки информационной системы для безопасной автомобильной

A.V. Propisnova, P.G. Mikhaylova
DEVELOPMENT OF INFORMATION SYSTEMS FOR THE TRANSPORTATION OF DANGEROUS CHEMICAL GOODS UNDER THE IMPLEMENTATION OF THE STATE INFORMATION SYSTEM OF ELECTRONIC TRANSPORT DOCUMENTS

Keywords: State information system of electronic transport documents, electronic document management, electronic waybill, information system, dangerous goods.

This article explores the need for electronic transport documents within the context of developing an information system for the safe transport of dangerous goods by road. The developed system provides shippers, consignees, and carriers with tools to create and modify electronic transport

перевозки опасных грузов. Разработанная система предоставляет грузоотправителям, грузополучателям и перевозчикам инструменты для формирования и изменения электронных перевозочных документов, в том числе транспортных накладных. Незарегистрированные пользователи могут ознакомиться с функционалом на примерах без возможности создания или скачивания документа. Авторы анализируют предпосылки создания системы и подводят итоги разработки.

documents, including consignment notes. Unauthorized users can explore the system's functionality through examples, but without the ability to create or download documents. The authors analyze the rationale behind the system's development and summarize the results.

М.Р. Ремизов, А.М. Мартиросян, Д.М. Мартиросян, С.П. Дюсьмекеев, С.Т. Хасанов
ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Ключевые слова: беспроводная сеть датчиков, блок-схема надежности, подсеть БСД, надежность сети, ресурсные ограничения.

В работе представлены результаты исследования надежности беспроводных сетей датчиков (БСД). Рассмотрены недостатки известных моделей БСД. Предложена математическая модель на базе групповой модели подсетей БСД. Получены формулы расчета показателей надежности в условиях ресурсных ограничений с использованием модели в виде блок-схемы надежности.

M.R. Remizov, A.M. Martirosian, D.M. Martirosian, S.P. Dusmekeev, S.T. Khasanov
ASSESSMENT OF WIRELESS TELECOMMUNICATION NETWORKS RELIABILITY

Keywords: *wireless sensor network, reliability block diagram, WSN subnet, network reliability, resource constraints.*

The paper presents the results of a study on the reliability of wireless sensor networks (WSNs). The disadvantages of the known WSN models are considered. A mathematical model based on a group model of WSN subnets is proposed. Formulas for calculating reliability indicators under resource constraints using a model in the form of a reliability flowchart are obtained.

Р.А. Симонов, П.А. Шагалова, Д.В. Волкова, Р.С. Кузьмин
ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ СЦЕНАРИЕВ ПОВЕДЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Ключевые слова: нейросетевые технологии, рекуррентные сети, генеративно-состязательные сети, журналирование информационных систем.

В статье рассматривается процесс разработки нейронной сети для генерации синтетических данных, в частности журналов событий информационных систем. Реализованный подход, основанный на совместном использовании рекуррентной и генеративно-состязательной сети, позволяет получить реалистичные, логически связанные и разнообразные сценарии поведения системы.

R.A. Simonov, P.A. Shagalova, D.V. Volkova, R.S. Kuzmin
APPLICATION OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES FOR IMPLEMENTATION AND RESEARCH OF INFORMATION SYSTEM BEHAVIOR SCENARIOS

Keywords: neural network technologies, recurrent networks, generative-adversarial networks, information systems journaling.

The article explores the process of developing a neural network for generating synthetic data, in particular, event logs of information systems. The implemented approach based on the joint use of recurrent and generative-adversarial network allows to obtain realistic, logically connected and diverse scenarios of system behavior.

А.В. Тарасов, В.О. Сапожников, Д.В. Жевнерчук
РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СОПРЯЖЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ОТКРЫТЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДОМЕННЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Ключевые слова:*доменные ограничения, открытые информационные системы, сопряжение компонентов, совместимость интерфейсов, алгебраические типы данных.*

В работе описанамодель сопряжения компонентов открытых информационных систем на основе представления интерфейса компонентов как комбинации алгебраического типа данных и доменных ограничений. Доменные ограничения рассматриваются как предикаты на множествах значений и могут комбинироваться с помощью логических операций. Вводится отношение частичного порядка между доменными ограничениями, позволяющее описать совместимость интерфейсов.

A.V. Tarasov, V.O. Sapozhnikov, D.V. Zhevnerchuk
DOMAIN CONSTRAINTS BASED OPEN INFORMATION SYSTEM COMPONENTS CONNECTION MODEL DEVELOPMENT

Keywords: domain constraints, open information systems, components connection, interface compatibility, algebraic data types.

This paper describes a model for integrating components of open information systems based on representing component interfaces as a combination of algebraic data types and domain constraints. Domain constraints are considered as predicates on sets of values and can be combined using logical operations. A partial order relation between domain constraints is introduced, enabling the description of interface compatibility.

С.А. Тихонов, А.А. Львов
МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ СЕТЕВОГО ТРАНСПОРТА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ С ПРЕРЫВИСТЫМ СОЕДИНЕНИЕМ

Ключевые слова: маршрутизация, беспроводная сенсорная сеть, протокол, транспортный метод, прерывание, цепь Маркова.

В работе представлен результаты анализа сквозного и пошагового методов передачи данных при фиксированном коэффициенте потерь. Используемая при анализе модель модифицирована путем применения метода потерь на основе двухпозиционной дискретно-временной цепи Маркова.

S.A. Tikhonov, A.A. L’vov
MODELING NETWORK TRANSPORT METHODS IN WIRELESS NETWORKS WITH INTERMITTENT CONNECTIVITY

Keywords: routing, wireless sensor network, protocol, transportation method, interruption, Markov chain.

This paper presents the results of analyzing the end-to-end and step-by-step methods of data transmission at a fixed loss factor. The model used in the analysis is modified by applying the loss method based on a two-position discrete-time Markov chain.

Е.Ф. Трофимова, В.И. Полуничев

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПАССИВНЫХ СИСТЕМ АВАРИЙНОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ОТВОДОМ ТЕПЛА К АТМОСФЕРНОМУ ВОЗДУХУ

Ключевые слова: водный и натриевый теплоноситель, система аварийного расхолаживания, воздушный теплообменник, защитная оболочка, пассивный теплоотвод, естественная циркуляция.

В статье представлен краткий анализ характерных вариантов пассивных систем аварийного расхолаживания отечественных и зарубежных реакторных установок с водным и натриевым теплоносителем с использованием в качестве охлаждающей среды атмосферного воздуха. Рассмотрены варианты с отводом тепла от парогенераторов непосредственно атмосферным воздухом, водяными и воздушными теплообменниками, теплоотводом воздухом от защитной оболочки. В результате проведенного сравнительного анализа выявлены принципиальные особенности, характеризующие основные достоинства и недостатки рассмотренных вариантов систем как по надежности, так и по практической реализации.

E.F. Trofimova, V.I. Polunichev

ANALITICAL REVIEW OF PASSIVE EMERGENCY COOLING SYSTEMS FOR REACTOR INSTALLATIONS WITH HEAT REMOVAL TO ATMOSPHERIC AIR

Keywords: water and sodium coolant, emergency cooling system, air heat exchanger, protective shell, passive heat sink, natural circulation.

The article presents a brief analysis of typical variants of passive emergency cooling systems for domestic and foreign reactor installations with water and sodium coolant using atmospheric air as a cooling medium. Options with heat removal from steam generators directly by atmospheric air, water and air heat exchangers, and heat removal by air from the protective shell are considered. As a result of the comparative analysis, the principal features characterizing the main advantages and disadvantages of the considered variants of the systems both in terms of reliability and practical implementation have been identified.

А.Н. Хайбуллин, С.А. Абашина, В.В. Бронская, К.В. Саерова, А.Р. Хайруллина, А.И. Шагеева, А.У. Аетов

МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ В ИССЛЕДОВАНИИ ФИНАНСОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КРУПНЫХ КОМПАНИЙ

Ключевые слова: Fortune 1000, экономические показатели, корреляционный анализ, рентабельность продаж, отраслевой анализ, прогнозирование прибыли.

В исследовании проведен комплексный анализ набора данных Fortune 1000, содержащего информацию о крупнейших компаниях США. Основное внимание уделено изучению взаимосвязей между ключевыми финансовыми показателями (выручка, прибыль, численность персонала), расчету показателя эффективности (ROS), сравнительному анализу эффективности по отраслям и оценке вариации внутри секторов. Использованы методы корреляционного анализа, визуализации данных, статистического тестирования и расчета коэффициента вариации. Результаты выявили значимые различия в эффективности между секторами и неоднородность внутри них. Обозначены перспективы разработки прогнозных моделей и алгоритмов детекции аномалий.

A.N. Khaibullin, S.A. Abashina, V.V. Bronskaya, K.V. Saerova, A.R. Khairullina, A.I. Shageeva, A.U. Aetov

METHODS OF SYSTEM ANALYSIS AND MATHEMATICAL STATISTICS IN THE STUDY OF FINANCIAL INDICATORS OF LARGE COMPANIES

Keywords: Fortune 1000, economic indicators, correlation analysis, sales profitability, industry analysis, profit forecasting.

The study provides a comprehensive analysis of the Fortune 1000 dataset containing information on the largest US companies. The main focus is on studying the relationships between key financial indicators (revenue, profit, headcount), calculating the ROS, comparative analysis of efficiency by industry and assessing variation within sectors. The methods of correlation analysis, data visualization, statistical testing and calculation of the variation coefficient are used. The results reveal significant differences in efficiency between sectors and heterogeneity within them. Prospects for developing predictive models and anomaly detection algorithms are outlined.

В.Д. Хашин, Д.Р. Новиков, А.В. Кожина, В.Р. Козлов, К.Е. Долженко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ RAG-СИСТЕМЫ НА ТОЧНОСТЬ ОТВЕТОВ НА ВОПРОСЫ АБИТУРИЕНТОВ

Ключевые слова: RAG, семантический поиск, лексический поиск, чанки, эмбеддинги, гибридный поиск, LLM, большая языковая модель, оптимизация параметров.

В работе исследуется влияние параметров RAG-системы (Retrieval-Augmented Generation) на качество ответов в контексте обработки естественного языка. Исследование включает анализ ключевых параметров системы, которые влияют на качество ответа. Система предназначена для автоматизированной консультации абитуриентов по вопросам поступления.

V.D. Khashin, D.R. Novikov, A.V. Kozhina, V.R. Kozlov, K.E. Dolzhenko

RESEACH OF THE IMPACT OF RAG SYSTEM PARAMETERS ON THE ACCURACY OF RESPONSES TO QUESTIONS OF APPLICANTS

Keywords: RAG, semantic search, lexical search, chunks, embeddings, hybrid search, LLM, large language model, parameter optimization.

This paper investigates the influence of RAG (Retrieval-Augmented Generation) system parameters on the quality of responses in the context of natural language processing. The study includes an analysis of key system parameters that affect response quality. The system is designed for automated consultation of applicants on university admission-related questions.

Е.А. Шнякина, В.Н. Костин

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ НАРУШИТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО МОДЕЛИ

Ключевые слова: вероятность обнаружения, модель нарушителя, безопасность объекта.

В работе представлена оценка вероятности обнаружения, учитывающая характеристики моделей нарушителей. На основе анализа научных публикаций и нормативно-правовых

E.A. Shniakina, V.N. Kostin

ASSESSING THE PROBABILITY OF DETECTING AN INVADER DEPENDING ON ITS MODEL

Keywords: probability of detection, intruder model, facility security.

The paper presents an assessment of the detection probability, taking into account the characteristics of the models of the violators. Based on the analysis of scientific

актов выделены шесть моделей нарушителей. Вероятность обнаружения нарушителей пропорциональна уровню их осведомлённости и подготовки, что учитывается с помощью введенного коэффициента, значение которого рассчитано для каждой модели внешних нарушителей.

publications and regulatory acts, six models of violators are allocated. The probability of detection of violators is proportional to the level of their awareness and training, which is taken into account by the introduced coefficient, the value of which is calculated for each model of external violators.

Т.М. Юсупов, О.В. Павлов, О.В. Хомутская
ТЕХНОЛОГИЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА МЕТОДОМ ПРОЦЕССИНГА ДАННЫХ НА БАЗЕ КРИВОЙ МОРТОНА

Ключевые слова: ГИС, процессинг данных, дерево квадрантов, цифровые модели рельефа.

В работе представлены результаты анализа технологии построения цифровых моделей рельефа на базе методов процессинга данных. В отличие от стандартных подходов, основанных на использовании дерева квадрантов, предложенный метод отображения цифровых моделей рельефа методом процессинга на базе кривой Мортона демонстрирует большую эффективность в работе с памятью, также улучшенные возможности к параллельной обработке данных. Это открывает перспективы для новых возможностей масштабируемой обработки пространственных данных в рамках современных геоинформационных технологий.

T.M. Yusupov, O.V. Pavlov, O.V. Khomutskaya
TECHNOLOGY OF RENDERING DIGITAL MODELS OF THE RELIEF BY DATA PROCESSING BASED ON THE MORTON CURVE

Keywords: GIS, data processing, quadrant tree, digital elevation models.

The article presents the results of an analysis of the technology of rendering digital elevation models based on data processing methods. Unlike standard approaches based on the use of a quadrant tree, the proposed method of rendering digital elevation models using the Morton curve processing method demonstrates different possibilities for building high-performance geoinformation visualization systems. This opens up prospects for new and promising capabilities for scalable processing of spatial data within the framework of modern geoinformation technologies.

Д.Е. Абрамов, Ш.Р. Мурадхаджаев, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, Р.А. Юсупов, Ш.Р. Юсупов, А.Л. Овчинников
ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДАТЧИКА ДИАПАЗОНА 5 ГГЦ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛАКТАТА В ПОТЕ СПОРТСМЕНА

Ключевые слова: носимые сенсоры; микроволновая сенсорика; микроволновая «кожа», лактат в поте, диапазон 5 ГГц, пороговый датчик.

Диапазон частот 5 ГГц широко используется в телекоммуникационных технологиях, например, Wi-Fi (стандарт 802.11ac), что делает его более доступным для внедрения в различных сенсорных системах. Использование этого диапазона позволяет легко интегрировать микроволновые датчики в мобильные устройства и системы мониторинга с минимальными затратами. Микроволновые датчики, работающие в диапазоне 5 ГГц, встроенные в портативные устройства типа микроволновой «кожи» для мониторинга показателей здоровья спортсмена в реальном времени – один из таких примеров. Такой подход позволяет создать мобильные и компактные системы для мониторинга лактата в поте, что будет полезно для автоматизированного контроля эффективности тренировок спортсменов.

D.E. Abramov, Sh.R. Muradkhadzhaev, O.G. Morozov, I.I. Nureev, R.A. Yusupov, Sh.R. Yusupov, A.L. Ovchinnikov
ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF A 5 GHZ SENSOR FOR MONITORING LACTATE IN ATHLETE'S SWEAT

Keywords: wearable sensors; microwave sensors; microwave "skin", lactate in sweat, 5 GHz range, threshold sensor.

The 5 GHz frequency range is widely used in telecommunication technologies, such as Wi-Fi (802.11ac standard), which makes it more accessible for implementation in various sensor systems. Using this range allows for easy integration of microwave sensors into mobile devices and monitoring systems with minimal costs. Microwave sensors operating in the 5 GHz range, built into portable devices such as microwave "skin" for monitoring athlete's health indicators in real time, are one such example. This approach allows creating mobile and compact systems for monitoring lactate in sweat, which will be useful for automated monitoring of the effectiveness of athletes' training.

Д.Е. Абрамов, П.С. Петухов, О.Г. Морозов, И.И. Нуреев, Р.А. Юсупов, Ш.Р. Юсупов, А.Л. Овчинников
ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДАТЧИКА ДИАПАЗОНА 2,45 ГГЦ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛАКТАТА В ПОТЕ СПОРТСМЕНА

Ключевые слова: носимые сенсоры; микроволновая сенсорика; лактат в поте; диапазон 2,45 ГГц; микроволновая «кожа».

Частота 2.45 ГГц является стандартом для различных беспроводных систем, включая Wi-Fi, Bluetooth и устройства для связи на короткие расстояния. Это делает её удобной для интеграции в существующие мобильные и портативные устройства, что важно для создания компактных и мобильных датчиков. Сигналы этой частоты могут достаточно глубоко проникать в кожу и пот, что позволяет проводить измерения с поверхности кожи, не требуя инвазивного вмешательства. При этом разрешающая способность остаётся достаточно высокой для точных измерений.

D.E. Abramov, P.S. Petukhov, O.G. Morozov, I.I. Nureev, R.A. Yusupov, Sh.R. Yusupov, A.L. Ovchinnikov
ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE OF A 5 GHZ SENSOR FOR MONITORING LACTATE IN ATHLETE'S SWEAT

Keywords: wearable sensors; microwave sensors; lactate in sweat; 2.45 GHz range; microwave "skin".

The 2.45 GHz frequency is the standard for various wireless systems, including Wi-Fi, Bluetooth, and short-range communication devices. This makes it convenient for integration into existing mobile and portable devices, which is important for creating compact and mobile sensors. Signals at this frequency can penetrate deep enough into skin and sweat, which allows measurements to be taken from the skin surface without requiring invasive intervention. At the same time, the resolution remains high enough for accurate measurements.

А.Э. Аксенов, А.А. Кузнецов, Р.М. Зайнутдинов,
А.В. Михеев, В.Ю. Дубровин, Е.А. Селюков, И.И. Нуреев

РАДИОФОТОННЫЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОДЕТЕКТОРОВ ДЛЯ СЕНСОРНЫХ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Ключевые слова: широкополосный фотодетектор; относительная АЧХ; электронный векторный анализатор цепей; радиофотонный интеррогатор; радиофотонный анализатор.

Оптические сигналы многофотонного и квантового уровня, генерируемые оптическими передатчиками, состоящими из лазеров и широкополосных модуляторов, преобразуются в электрические сигналы широкополосными фотодетекторами (ШФД). Как правило, в системах мониторинга спектральных характеристик (относительных АЧХ) элементов указанного класса, применяются гетеродинные, многоуровневые и многокаскадные модуляторные схемы с управлением и регистрацией на электронных векторных анализаторах цепей (ЭВАЦ). Однако их структуры достаточно сложны, дорогостоящи и требуют, как улучшения метрологических характеристик, так и структурной минимизации. В частности, самым дорогостоящим элементом этих устройств может быть и сам ЭВАЦ. В настоящей статье рассмотрены вопросы построения радофотонного анализатора относительных АЧХ, построенного на принципах радиофотонного интеррогатора для опроса датчиков сенсорных сетей с волновым откликом.

A.E. Aksenov, A.A. Kuznetsov, R.M. Zainutdinov,
A.V. Mikheev, V.Yu. Dubrovin, E.A. Selyukov, I.I. Nureev

MICROWAVE PHOTONIC ANALYZER FOR PHOTODETECTORS SPECTRAL CHARACTERIZATION IN SENSOR AND TELECOMMUNICATION NETWORKS

Keywords: broadband photodetector; relative frequency response; electronic vector network analyzer; microwave photonic interrogator; microwave photonic analyzer.

Optical signals of multiphoton and quantum levels generated by optical transmitters consisting of lasers and broadband modulators are converted into electrical signals by broadband photodetectors. As a rule, heterodyne, multilevel and multi-stage modulator circuits with control and recording on electronic vector network analyzers (EVNAs) are used in systems for monitoring spectral characteristics (relative frequency responses) of elements of the specified class. However, their structures are quite complex, expensive and require both improved metrological characteristics and structural minimization. In particular, the EVNAs themselves can be the most expensive element of these devices. This article considers the issues of constructing a microwave photonic analyzer of relative frequency responses based on the principles of a microwave photonic interrogator for sensors of sensor networks with a wave response.

Р.И. Алексеев, И.И. Нуреев, С.Н. Нигматуллин, А.А. Потанин,
Э.М. Шарафутдинов, Т.Р. Гизатуллин, Г.Ж. Нуреева

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ НАГРЕВА В ТЕРМОАНЕМОМЕТРАХ СКОРОСТИ ПОТОКА В ТРУБОПРОВОДАХ

Ключевые слова: трубопровод; скорость потока; волоконная сенсорика; термоанемометр; опосредованный нагрев.

Среди множества, существующих на сегодняшний день методов измерения скоростей потоков газов и жидкостей, можно выделить крупные группы, принципы работы которых, заложены в большинстве устройств, выпускаемых на данный момент. В литературе представлены различные типы анемометров и велосиметров — устройств, предназначенных для измерения скоростей потоков газов и жидкостей. При этом многие методики могут применяться как для одного, так и для другого типа среды. В дальнейшем в данной работе под анемометрами будут пониматься приборы, используемые для измерения скоростей потоков жидкости и газов (тепловые анемометры типа «с горячей проволокой»). Для ряда сред прямой нагрев может быть невозможен. В работе рассмотрены волоконно-оптические анемометры с опосредованным нагревом волокна.

R.I. Alekseev, I.I. Nureev, S.N. Nigmatullin, A.A. Potanin,
E.M. Sharafutdinov, T.R. Gizatullin, G.Zh. Nureeva

SOLVING THE PROBLEM OF HEATING IN THERMO ANEMOMETERS OF FLOW VELOCITY IN PIPELINES

Keywords: pipeline; flow rate; fiber optic sensors; thermal anemometer; indirect heating.

Among the many methods of measuring gas and liquid flow rates that exist today, large groups can be distinguished, the operating principles of which are embedded in most devices produced at the moment. The literature presents various types of anemometers and velocimeters - devices designed to measure gas and liquid flow rates. In this case, many methods can be applied to both types of media. In the following, in this paper, anemometers will be understood as devices used to measure the flow rates of liquids and gases (thermal anemometers of the "hot wire" type). For a number of media, direct heating may not be possible. The paper considers fiber-optic anemometers with indirect heating of the fiber.

Р.И. Алексеев, И.И. Нуреев, С.Н. Нигматуллин,
А.А. Силантьева, Э.М. Шарафутдинов, Т.Р. Гизатуллин,
Г.Ж. Нуреева

МНОГОСЕРДЦЕВИННЫЙ ОДНОВОЛОКОННЫЙ ТЕРМОАНЕМОМЕТР СКОРОСТИ ПОТОКА В ТРУБОПРОВОДАХ

Ключевые слова: трубопровод; скорость потока; волоконная сенсорика; термоанемометр; адресная волоконная брэгговская структура; многосердцевинное волокно.

Проведенный нами анализ позволил сформулировать общую и частные задачи разработки системы волоконно-оптического квази-распределенного контроля температуры для мониторинга скорости потока жидкости с целью построения новых систем обладающих преимуществами спектрального прямого контроля по ВБР. В области применяемых брэгговских структур в системе необходимо исследовать возможности замены ВБР на адресные волоконные брэгговские структур (АВБС), привязывающих показания температуры к конкретной точки волокна. Однако, АВБС как правило имеют большую

R.I. Alekseev, I.I. Nureev, S.N. Nigmatullin,
A.A. Silant’eva, E.M. Sharafutdinov, T.R. Gizatullin,
G.Zh. Nureeva

MULTICORE ONE FIBER THERMO-ANEMOMETER FOR FLOW VELOCITY MEASUREMENTS IN PIPELINES

Keywords: pipeline; flow rate; fiber sensing; hot-wire anemometer; addressable fiber Bragg structure; multi-core fiber.

Our analysis allowed us to formulate the general and specific problems of developing a fiber-optic quasi-distributed temperature monitoring system for monitoring the fluid flow rate in order to build new systems with the advantages of spectral direct monitoring using FBG. In the area of the Bragg structures used in the system, it is necessary to study the possibilities of replacing FBG with addressable fiber Bragg structures (AFBS), which bind temperature readings to a specific point in the fiber. However, AFBS are usually long, which limits their use as

длину, что ограничивает их применение как точечных датчиков. В работе рассмотрены волоконно-оптические анемометры на АВБС, которые записаны по отдельным компонентам в многосердцевинном волокне.

point sensors. The paper considers fiber-optic anemometers on AFBS, which are recorded by individual components in a multi-core fiber.

Ф.М. Виноградов, С.В. Литвинов, А.А. Верещагин
ВЛИЯНИЕ СТЫКОВКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА НА ПОТЕРИ СИГНАЛА

Ключевые слова: волоконно-оптические линии связи, ВОЛС, сварка.

Качество передачи данных в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) зависит от многих факторов. Потери в мощности передаваемого сигнала наблюдаются в разъемных соединениях (т.е. при использовании коннекторов). Также потери появляются в случае обрыва и последующего неидеального соединения методом сварки. В статье оцениваются потери мощности передачи сигнала в ВОЛС в случае неразрывного соединения, качественной сварки волокна и заведомо неидеальной сварки. Работа носит прикладной характер, и результаты могут быть полезны при проектировании ВОЛС.

F.M. Vinogradov, S.V. Litvinov, A.A. Vereshchagin
THE EFFECT OF OPTICAL FIBER DOCKING FOR SIGNAL LOSS

Keywords: fiber-optic communication lines, FOLS, welding.

The quality of data transmission in fiber-optic communication lines depends on many factors. Losses in the power of the transmitted signal are observed in split connections (i.e., when using connectors). Losses also occur in case of breakage and subsequent imperfect welding connection. The article estimates the loss of signal transmission power in the FOLS in the case of an inseparable connection, high-quality fiber welding and obviously imperfect welding. The work is of an applied nature, and the results can be useful in the design of FOLS.

М.С. Виноградов, Т.А. Дехтярь, И.О. Разинкин
АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ АППАРАТУРЫ НА ФНЗС В РЛС С ЦИФРОВЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ СИГНАЛОВ

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, ФОРС, согласованная фильтрация.

В данной работе предложен алгоритм, позволяющий повысить эффективность согласованной обработки сигналов в РЛС, построенных на основе цифровых блоков ФОРС. Проведено экспериментальное подтверждение эффективности алгоритма, и оценены улучшения ТТХ РЛС при его применении.

M.S. Vinogradov, T.A. Dekhtyar, I.O. Razinkin
ALGORITHM FOR COMPENSATING HARDWARE IMPACT ON THE AMBIGUITY FUNCTION IN RADAR WITH DIGITAL WAVEFORM GENERATION

Keywords: digital signal processing, RSFPU, matched filtering.

This work proposes an algorithm that improves the efficiency of matched signal processing in radars based on digital Radar Signal Formation and Processing Units (RSFPUs). Experimental validation of the algorithm's effectiveness is provided, and enhancements to the radar's performance characteristics upon its implementation are evaluated.

А.Д. Громов
ТРАНСЛЯЦИЯ EDDL ОПИСАНИЙ

Ключевые слова: транслятор, электронное описание устройства, трансляция кода, (система мониторинга и диагностики).

В работе представлены результаты разработки транслятора электронных описаний устройств на языке EDDL в формате .fm8. Транслятор выполняет интерпретацию конструкций EDDL в информационную модель и генерирует эквивалентный код для этой модели на языке программирования C++. Представлены основные результаты испытаний транслятора EDDL.

A.D. Gromov
TRANSLATION OF EDDL DESCRIPTIONS

Keywords: translator, electronic device description, code translation, (monitoring and diagnostic system).

This paper presents the results of the development of a translator of electronic device descriptions in the EDDL language in the format .fm8. The translator interprets EDDL constructs into an information model and generates equivalent code for this model in the C++ programming language. The main test results of the EDDL translator are presented.

Д.В. Гусев, О.А. Билоус
СИНТЕЗ КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПАРА В СУШИЛЬНОМ ЦИЛИНДРЕ

Ключевые слова: передаточная функция, звено чистого запаздывания, ПИД-регулятор.

Произведён расчёт и моделирование каскадного контура регулирования давления пара, подаваемого в сушильный цилиндр бумагоделательной машины, а также регулирования перепада давления на входе и выходе контура. В результате осуществляется корректировка подачи пара до достижения требуемого уровня давления и перепада.

D.V. Gusev, O.A. Bilous
SYNTHESIS OF A CASCADE SYSTEM FOR AUTOMATIC CONTROL OF VAPOR PRESSURE IN THE DRY CYLINDER

Keywords: transfer function, pure delay link, PID controller.

The calculation and modeling of the cascade loop of steam pressure control supplied to the drying cylinder of the paper machine, as well as the regulation of the pressure differential at the inlet and outlet of the loop. As a result, the adjustment of the steam supply is carried out until the required level of pressure and differential.

Т.М. Закирьянов, А.З. Петрова, О.В. Никишина, Д. Даххам, Г.А. Морозов, С.В. Смирнов, Ю.Е. Седельников
МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ключевые слова: микроволновый резонансный датчик влажности; распределение ЭМП; равномерность; влажность; компенсация; автоматизация контроля.

Ранее нами был разработан резонансный датчик измерения

T.M. Zakiryanov, A.Z. Petrova, O.V. Nikishina, D. Dakhkham, G.A. Morozov, S.V. Smirnov, Yu.E. Sedelnikov
MODELING OF A MICROWAVE HUMIDITY SENSOR WITH TEMPERATURE COMPENSATION

Keywords: microwave resonant humidity sensor; EMF distribution; uniformity; humidity; compensation; control automation.

Previously, we developed a resonant sensor for measuring

влажности куриного помёта и конского навоза в среде электродинамического моделирования CST Studio Suite. Была проведена оптимизация его размеров для того, чтобы добиться наилучшего графика коэффициента передачи. Для измерения температуры материала в разрабатываемый датчик внедрено оптическое волокно. При моделировании оптического волокна были использованы параметры для кварца, а именно: относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon' = 2.0851$, тангенс угла диэлектрических потерь $tg\,\delta = 7.9 \times 10^{-5}$. Конструкция такого датчика позволяет расположить жилу оптического волокна несколькими способами, что существенно скажется на результатах моделирования. Данный фактор был ключевым для обеспечения правильных законов компенсации температуры.

the humidity of chicken and horse manure in the CST Studio Suite electrodynamic modeling environment. Its dimensions were optimized in order to achieve the best transmission coefficient graph. To measure the temperature of the material, an optical fiber is embedded in the developed sensor. When modeling the optical fiber, the parameters for quartz were used, namely: relative permittivity $\varepsilon' = 2.0851$, dielectric loss tangent $tg\delta = 7.9 \times 10^{-5}$. The design of such a sensor allows the optical fiber core to be positioned in several ways, which will significantly affect the modeling results. This factor was key to ensuring the correct temperature compensation laws.

Т.М. Закирьянов, А.З. Петрова, О.В. Никишина, Д. Даххам, Г.А. Морозов, С.В. Смирнов, Ю.Е. Седельников

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛА БЕЗ КОМПЕНСАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Ключевые слова: микроволновый резонансный датчик влажности; распределение ЭМП; равномерность; влажность; автоматизация контроля.

За основу разрабатываемого кольцевого резонаторного датчика влажности материала, обеспечивающего технологический процесс микроволновой сушки куриного помета и конского навоза, была взята симметричная полосковая линия с резонансной частотой 2,48 ГГц. Модель датчика разработана в программном продукте электромагнитного моделирования CST Microwave Studio. Геометрические параметры итогового датчика будут результатом оптимизации размеров, полученных путём математического расчёта. Интересуемые параметры моделируемого датчика – это основная резонансная частота, добротность и значение коэффициента передачи на резонансной частоте (амплитуда резонанса) при различных физических размерах образцов, а также диэлектрической проницаемости при заданной влажности.

T.M. Zakiryanov, A.Z. Petrova, O.V. Nikishina, D. Dakhkham, G. A. Morozov, S.V. Smirnov, Yu.E. Sedelnikov

MODELING A MICROWAVE SENSOR FOR MEASURING MATERIAL HUMIDITY WITHOUT TEMPERATURE COMPENSATION

Keywords: microwave resonant humidity sensor; EMF distribution; uniformity; humidity; control automation.

The developed ring resonator sensor for measuring material humidity, which ensures the technological process of microwave drying of chicken manure and horse manure, is based on a symmetrical strip line with a resonant frequency of 2.48 GHz. The sensor model was developed in the electromagnetic modeling software product CST Microwave Studio. The geometric parameters of the final sensor will be the result of optimizing the dimensions obtained by mathematical calculation. The parameters of interest for the simulated sensor are the main resonant frequency, quality factor, and the value of the transmission coefficient at the resonant frequency (resonance amplitude) for different physical sizes of samples, as well as the permittivity at a given humidity.

Ю.В. Зубкова, Ю.Р. Никитин, Д.Б. Зубков

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ПИ-РЕГУЛЯТОРОМ

Ключевые слова: мобильный робот, математическая модель, ПИ-регулятор.

Исследована модель системы управления мобильного робота с ПИ-регулятором. Разработана схема электрическая принципиальная системы управления на базе модуля ESP32. Выполнено имитационное моделирование управлением бесколлекторным двигателем постоянного тока в программе SimInTech.

Yu.V. Zubkova, Yu.R. Nikitin, D.B. Zubkov

RESEARCH OF THE MOBILE ROBOT CONTROL SYSTEM MODEL WITH A PI CONTROLLER

Keywords: mobile robot, mathematical model, PI controller.

The model of the mobile robot control system with a PI controller has been studied. An electrical schematic diagram of the control system based on the ESP32 module has been developed. Simulation modeling of the control of a BLDC motor has been performed in the SimInTech program.

А.А. Казин

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОМОДУЛЕЙ 433 МГЦ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ СБОРА ДАННЫХ

Ключевые слова: микроконтроллер, радиомодуль 433 Мгц, Arduino UNO, Arduino IDE, Processing.

В работе рассмотрено использование радиомодулей 433 МГц в системах по сбору данных. Предложено решение, предоставляющее возможность дистанционной передачи значений, тем самым повышая удобство работы с оборудованием. Решение протестировано на учебном оборудовании включающим в себя: платы Arduino UNO, термопары, радиомодули 433 МГц. Также для создания системы сбора данных было написано программное обеспечение для плат Arduino UNO, в среде Processing разработано ПК приложение анализа и обработки данных, разработан собственный метод передачи данных. Функционал ПК приложения включает в себя: обработку и визуализацию приходящих значений.

A.A. Kazin

APPLICATION OF 433 MHz RADIO MODULES IN PRODUCTION DATA COLLECTION SYSTEMS

Keywords: microcontroller, 433 MHz radio module, Arduino UNO, Arduino IDE, Processing..

The paper discusses the use of 433 MHz radio modules in data collection systems. A solution is proposed that allows for remote transmission of values, thereby enhancing the usability of the equipment. The solution has been tested on educational equipment that includes Arduino UNO boards, thermocouples, and 433 MHz radio modules. Additionally, software has been developed for the Arduino UNO boards, a PC application for data analysis and processing has been created in the Processing environment, and a custom data transmission method has been developed. The PC application's functionality includes processing and visualizing incoming values.

М.А. Карпов, Е.А. Морозова

ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ QAM-СИГНАЛОВ В РАДИОКАНАЛЕ С ЗАМИРАНИЯМИ НА ИМИТАЦИОННОМ ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ

Ключевые слова: M-QAM, BER, Keysight Propsim, отношение сигнала к шуму (SNR), битовая ошибка (BER), замирания, многолучевость, канал Рэлея, канал Райса.

В статье рассмотрен вопрос оценки помехоустойчивости QAM-сигналов в радиоканале с замираниями Рэлея и Райса с помощью лабораторного стенда. Описан алгоритм формирования сигналов, настройки модели радиоканала и методика оценки битовой ошибки. Описанный метод позволяет производить оценку помехоустойчивости связной радиоаппаратуры в лабораторных условиях.

M.A. Karpov, E.A. Morozova

EVALUATION OF QAM SIGNAL NOISE IMMUNITY IN A FADING RADIO CHANNEL USING A LABORATORY TEST BENCH

Keywords: M-QAM, BER, Keysight Propsim, signal-to-noise ratio (SNR), bit error rate (BER), fading, multipath propagation, Rayleigh channel, Rice channel.

The article discusses the evaluation of noise immunity of QAM signals in a radio channel with Rayleigh and Rice fading using a laboratory test bench. The algorithm for signal generation, radio channel model configuration, and bit error rate evaluation methodology are described. The proposed method allows assessing the noise immunity of communication radio equipment under laboratory conditions.

В.С. Кондратьев, Ю.Е. Седельников, Р.М. Зайнутдинов, А.В. Михеев, Е.А. Селюков, О.В. Никишина, В.В. Садчиков

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАССИВА МИКРОВОЛНОВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ

Ключевые слова: микроволновая сенсорика; резонансный датчик; комплементарным разрезным кольцевым резонатором; последовательный массив датчиков; диэлектрическая проницаемость воды.

В данной статье представлен дизайн-проект массива микроволновых датчиков для тестирования качества воды. Массив датчиков состоит из пяти элементов, каждый из которых спроектирован на основе микрополосковой линии передачи, нагруженной комплементарным разрезным кольцевым резонатором (CSRR), резонирующим на разной частоте в диапазоне от 1 ГГц до 10 ГГц. После проведенных теоретических расчетов был сформирован образ отдельного датчика в программе электродинамического моделирования и синтезирован их массив. В заключительном разделе было исследовано изменение параметра S_{21} массива датчиков в зависимости от диэлектрической проницаемости водных растворов.

V.S. Kondratyev, Yu.E. Sedelnikov, R.M. Zainutdinov, A.V. Mikheev, E.A. Selyukov, O.V. Nikishina, V.V. Sadchikov

DESIGN, OPTIMIZATION AND PARAMETRIC STUDY OF MICROWAVE RESONATOR ARRAY FOR WATER QUALITY DETERMINATION

Keywords: microwave sensorics; resonant sensor; complementary split ring resonator; serial sensor array; permittivity of water.

This paper presents a design project of a microwave sensor array for water quality testing. The sensor array consists of five elements, each of which is designed on the basis of a microstrip transmission line loaded with a complementary split ring resonator (CSRR) resonating at different frequencies in the range from 1 GHz to 10 GHz. After the theoretical calculations were performed, an image of a separate sensor was formed in the electrodynamic modeling program and their array was synthesized. In the final section, the change in the parameter S21 of the sensor array was investigated depending on the permittivity of aqueous solutions.

Р.Р. Константинов, Р.В. Фахрутдинов, Е.А. Мезенцева, Д.А. Веденькин, В.Ю. Дубровин, А.Р. Насыбуллин, А.А. Силантьева

УПРАВЛЯЕМАЯ БРЭГГОВСКАЯ СТРУКТУРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АНТЕНН РАДИОФОТОННЫХ ЛОКАТОРОВ И ФАЗОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СЕНСОРОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Ключевые слова: радиофотонная локация; микроволновая сенсорика; периодические брэгговские структуры; управление фазой коэффициента передачи; измерение фазы коэффициента передачи.

В данной статье спроектирована и промоделирована периодическая брэгговская структура с подключенными сосредоточенными элементами, качестве которых были выбраны варикапы BB857. Для подключения варикапов к периодической брэгговской структуре использованы контактные площадки, рассчитанные для конкретной модели сосредоточенного элемента. Затем, изменяя значение напряжения, приложенного к варикапам, были оценены частотные характеристики, в частности, фаза коэффициента передачи структуры. Полученные законы ее изменения позволили возможности широкого применения такой структуры, в том числе для контроля фазового распределения антенн радиофотонных локаторов и фазовой чувствительности сенсоров диэлектрической проницаемости. Обе эти задачи существенны как для радиофотонной локации, так и для микроволновой сенсорики.

R.R. Konstantinov, R.V. Fakhrutdinov, E.A. Mezentseva, D.A. Vedenkin, V.Yu. Dubrovin, A.R. Nasybullin, A.A. Silantyeva

CONTROLLED BRAGG STRUCTURE FOR DRIVING THE PHASE DISTRIBUTION OF MICROWAVE PHOTONIC LOCATOR ANTENNAS AND THE PHASE SENSITIVITY OF DIELECTRIC PERMITTIVITY SENSORS

Keywords: microwave photonic locator; microwave sensorics; periodic Bragg structures; control of the phase of the transfer coefficient; measurement of the phase of the transfer coefficient.

In this paper, a periodic Bragg structure with connected lumped elements, varicaps BB857, were designed and simulated. To connect varicaps to the periodic Bragg structure, contact pads designed for a specific lumped element model were used. Then, by changing the voltage applied to the varicaps, the frequency characteristics were estimated, in particular, the phase of the structure's transfer coefficient. The obtained laws of its change allowed the possibility of wide application of such a structure, including monitoring the phase distribution of microwave photonic locator antennas and the phase sensitivity of permittivity sensors. Both of these tasks are essential for given technical problems.

В.И. Курир

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Ключевые слова: токоограничивающие устройства высоковольтной электроэнергетики, сверхпроводниковые устройства в энергетике.

Тенденции развития электроэнергетических систем (ЭЭС), тесно связанные с общим экономическим развитием, характеризуются устойчивым ростом электрических нагрузок и соответствующим увеличением генерирующих мощностей, усилением связей с соседними ЭЭС и созданием крупных объединенных систем. Неизбежным следствием такого развития является рост токов короткого замыкания, особенно остро проявляющийся в регионах с высокой плотностью энергопотребления, а также мегаполисах и необходимость создания новых высоковольтных быстродействующих токоограничивающих устройств.

V.I. Kurir

METHODS OF REDUCING SHORT-CUT CURRENT IN THE POWER INDUSTRY

Keywords: current limiting devices of high-voltage electric power industry, superconducting devices in the energy industry.

The trends in the development of electric power systems (EPS), which are closely related to the overall economic development, are characterized by a steady increase in electrical loads and a corresponding increase in generating capacities, strengthening ties with neighboring EPS and the creation of large integrated systems covering not only the territories of individual countries, but also entire continents. The inevitable consequence of this development is an increase in short-circuit currents, which is especially acute in regions with high energy consumption density, as well as in megacities.

Р.Р. Нигматуллин, А.Р. Насыбуллин, Ю.Е. Седельников, Р.В. Фархутдинов, О.В. Никишина, С.Г. Алюшина, В.И. Баязитова

МИКРОПОЛОСКОВЫЙ СВЧ-КОМПАРАТОР НА РЕЗОНАНСЕ ФАНО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОРОШКОВ

Ключевые слова: микроволновая сенсорика; СВЧ-компаратор; резонанс Фано; диэлектрическая проницаемость; порошковый материал; плотность.

Формирование резонанса Фано в микрополосковой структуре СВЧ-компаратора позволяет значительно повысить точность и чувствительность измерений диэлектрической проницаемости порошковых материалов. Резонансный отклик, обладающий характерной асимметрией, предоставляет уникальную возможность регистрации малейших изменений диэлектрических свойств, связанных с плотностью уплотнения материала. В совокупности с функцией компаратора, предложенный подход обеспечивает воспроизводимую и точную методику для калибровки и автоматизированной оценки качества порошков в различных производственных и исследовательских условиях. В данной статье рассматривается один из вариантов такого компаратора для исследования зависимости изменения диэлектрической проницаемости порошковых материалов от их плотности.

R.R. Nigmatullin, A.R. Nasybullin, Yu.E. Sedelnikov, R.V. Farkhutdinov, O.V. Nikishina, S.G. Alyushina, V.I. Bayazitova

MICROSTRIP MICROWAVE COMPARATOR BASED ON FANO RESONANCE FOR POWDER DENSITY STUDY

Keywords: microwave sensorics; microwave comparator; Fano resonance; permittivity; powder material; density.

Formation of Fano resonance in the microstrip structure of the microwave comparator allows to significantly increase the accuracy and sensitivity of measurements of the permittivity of powder materials. The resonance response, which has a characteristic asymmetry, provides a unique opportunity to register the slightest changes in dielectric properties associated with the density of the material compaction. Together with the comparator function, the proposed approach provides a reproducible and accurate technique for calibration and automated assessment of the quality of powders in various production and research conditions. This article considers one of the versions of such a comparator for studying the dependence of the change in the permittivity of powder materials on their density.

Д.А. Сайфутдинов, А.З. Петрова, Г.А. Морозов, Д. Даххам, О.Г. Морозов, С.В. Смирнов, М.И. Гараев

АНАЛИЗ ПОТЕРИ ВЕСА КАК КРИТЕРИЙ КОНТРОЛЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СВЧ НАГРЕВА ЦЕЛЫХ ШИШЕК

Ключевые слова: СВЧ-обработка; распределение интенсивности ЭМП; равномерность; целые шишки; потеря веса; автоматизация контроля.

Микроволновая камера, несмотря на простоту конструкции, является достаточно сложным устройством для автоматизации. Для лучшего взаимодействия нагретого объекта с СВЧ-поля, в СВЧ-камере конструктивно стараются добиться большего количества максимумов высших мод. Однако в современных программных продуктах электродинамического моделирования не реально получить результаты, близкие к практическим. Это позволяет оптимизировать дизайн камеры и повысить равномерность нагрева только практически. В данной статье приведены исследования потери веса цельных шишек для определения момента окончания процесса их СВЧ-нагрева с целью максимально сохранить качество выделенных семян.

D.A. Saifutdinov, A.Z. Petrova, G.A. Morozov, D. Dakhkham, O.G. Morozov, S.V. Smirnov, M.I. Garayev

ANALYSIS OF WEIGHT LOSS AS A CONTROL CRITERION FOR AUTOMATION OF WHOLE CONES MICROWAVE HEATING PROCESS

Keywords: microwave processing; EMF intensity distribution; uniformity; whole cones; weight loss; automation of control.

Despite the simplicity of the design, the microwave chamber is a rather complex device for automation. For better interaction of the heated object with the microwave field, in the microwave chamber they try to achieve a greater number of maxima of higher modes. However, in modern software products of electrodynamic modeling it is not possible to obtain results close to practical ones. This allows optimizing the chamber design and increasing the uniformity of heating only in practice. This article presents studies of the weight loss of whole cones to determine the moment of completion of the process of their microwave heating in order to maximally preserve the quality of the extracted seeds.

Д.А. Сайфутдинов, А.З. Петрова, Г.А. Морозов, Д. Даххам, О.Г. Морозов, С.В. Смирнов, М.И. Гараев

АНАЛИЗ ПОТЕРИ ВЕСА КАК КРИТЕРИЙ КОНТРОЛЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СВЧ НАГРЕВА ПОЛОВИН ШИШЕК

Ключевые слова: СВЧ-обработка; распределение

D.A. Saifutdinov, A.Z. Petrova, G.A. Morozov, D. Dakhkham, O.G. Morozov, S.V. Smirnov, M.I. Garayev

ANALYSIS OF WEIGHT LOSS AS A CONTROL CRITERION FOR AUTOMATION OF HALF CONES MICROWAVE HEATING PROCESS

Keywords: microwave processing; EMF intensity

интенсивности ЭМП; равномерность; половины шишек; потеря веса; автоматизация контроля.

В отличие от классических тепловых печей, нагрев шишек в СВЧ -печах для экстракции семян происходит не только по их поверхности, но и по его объёму: радиоволны СВЧ-частот проникают примерно на 1,5-2,5 см вглубь шишек. Это сокращает время нагрева; средняя скорость нагрева составляет 0,3-0,5 °С в секунду. Более того, процесс нагрева зависит от состава и влажности шишек, что требует точной настройки режима работы СВЧ-печи для достижения оптимальных результатов и предотвращения перегрева. В данной статье приведены исследования потери веса шишек, разделенных пополам вдоль длинной оси, для определения момента окончания процесса их СВЧ-нагрева по сравнению с целыми шишками с целью максимально сохранить качество выделенных семян.

distribution; uniformity; half cones; weight loss; automation of control.

Unlike traditional heat ovens, cones are heated in microwave ovens for seed extraction not only on their surface, but also on their volume: microwave radio waves penetrate approximately 1.5-2.5 cm deep into the cones. This reduces the heating time; the average heating rate is 0.3-0.5 °C per second. Moreover, the heating process depends on the composition and humidity of the cones, which requires precise adjustment of the microwave oven mode to achieve optimal results and prevent overheating. This article presents studies of the weight loss of cones divided in half along the long axis to determine the moment of completion of their microwave heating process compared to whole cones in order to maximally preserve the quality of the extracted seeds.

А.А. Чесноков, А.Р. Насыбуллин, Т.М. Ишкаев, Р.В. Фархутдинов, О.В. Никишина, С.Г. Алюшина, В.И. Баязитова

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ НА КОЛЬЦЕВОМ РЕЗОНАТОРЕ

Ключевые слова: вещества и материалы; удельная плотность; микроволновая сенсорика; метод кольцевого резонатора; математическое обеспечение.

Для измерения диэлектрических свойств материала пользователю необходимо знать соответствующие методы измерения и преобразования. Необходимо использовать методы, адаптированные для измеряемого материала, поскольку конкретный метод применим к конкретному материалу. Если использовать неадаптированные методы, результаты измерений будут неудовлетворительными. Одним из универсальных методов является метод кольцевого резонатора. Процедуры и математическое обеспечение определения удельной плотности веществ и материалов с помощью данного метода рассматриваются в данной статье.

A.A. Chesnokov, A.R. Nasybullin, T.M. Ishkaev, R.V. Farkhutdinov, O.V. Nikishina, S.G. Alyushina, V.I. Bayazitova

UNIVERSAL METHOD FOR MEASURING SPECIFIC DENSITY OF SUBSTANCES AND MATERIALS ON A RING RESONATOR

Keywords: substances and materials; specific density; microwave sensorics; ring resonator method; mathematical support.

To measure the dielectric properties of a material, the user needs to know the appropriate measurement and conversion methods. It is necessary to use methods adapted to the measured material, since a specific method is applicable to a specific material. If unadapted methods are used, the measurement results will be unsatisfactory. One of the universal methods is the ring resonator method. The procedures and mathematical support for determining the specific density of substances and materials using this method are considered in this article.

Д.В. Кондратов, Л.А. Кочкуров, Н.Ю. Хороводова

АНАЛИЗ РИСКОВ НАРУШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ОБЛАСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИПТОВАЛЮТ И КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ КОШЕЛЬКОВ

Ключевые слова: криптовалюта, криптографические кошельки, информационная безопасность, технологии блокчейн.

Статья посвящена основных проблем криптовалют и криптокошельков с точки зрения информационной безопасности. Сделан общий обзор существующих организационных и правовых мер, требующих решения в настоящее время. Предложены основные решения рассмотренных проблем.

D.V. Kondratov, L.A. Kochkurov, N.Yu. Khorovodova

ANALYSIS OF THE RISKS OF INFORMATION SECURITY BREACHES IN THE FIELD OF USING CRYPTOCURRENCIES AND CRYPTOGRAPHIC WALLETS

Keywords: cryptocurrency, cryptographic wallets, information security, blockchain technologies.

The article is devoted to the main problems of cryptocurrencies and crypto wallets from the point of view of information security. A general overview of existing organizational and legal measures that require solutions at the present time is made. The main solutions to the problems considered are proposed.

А.Н. Прилепский, С.В. Литвинов

ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ M-PSK-СИГНАЛОВ НА СТЕНДЕ KEYSIGHT-PROPSIM

Ключевые слова: PSK, помехоустойчивость, многолучевое распространение.

В условиях стремительного развития беспроводных технологий особую актуальность приобретает задача повышения надёжности передачи данных в многолучевых каналах связи. В статье рассматривается проблема оценки помехоустойчивости многопозиционных сигналов PSK (Phase Shift Keying) в условиях замираний и многолучевого распространения. Результаты могут быть полезны при проектировании устойчивых к помехам телекоммуникационных систем, особенно в условиях городской среды и мобильных сетей нового поколения.

A.N. Prilepskiy, S.V. Litvinov

EVALUATION OF THE NOISE IMMUNITY OF M-PSK SIGNALS AT THE KEYSIGHT-PROPSIM STAND

Keywords: PSK, noise immunity, multipath propagation.

With the rapid advancement of wireless technologies, the challenge of improving data transmission reliability in multipath communication channels is becoming increasingly relevant. This article addresses the problem of evaluating the noise immunity of multi-position PSK (Phase Shift Keying) signals under conditions of fading and multipath propagation. The results may be useful in the design of noise-resistant telecommunication systems, particularly in urban environments and next-generation mobile networks.

Публичный лицензионный договор-оферта о правах на статью

Редакция журнала «Научно-технический вестник Поволжья» предлагает Вам присылать свои статьи для публикации на страницах журнала, а также на сайте Научной электронной библиотеки (НЭБ). Предоставление Автором своего произведения является полным и безоговорочным акцептом, т.е. данный договор считается заключенным с соблюдением письменной формы. Присылая для публикации произведение, Автор также предоставляет Редакции журнала права на использование произведения и гарантирует, что он обладает достаточным объемом прав на передаваемое произведение. Также Автор предоставляет редакции журнала право переуступить на договорных условиях частично или полностью полученные по настоящему Договору права третьим лицам без выплаты Автору вознаграждения. Все авторские права регулируются в соответствии с действующим законодательством России.

Договор публичной оферты по обработке персональных данных

В процессе осуществления выпуска журнала "Научно-технический вестник Поволжья", ООО "Рашин Сайнс" осуществляется обработка персональных данных, предоставленных авторами статей в рамках сообщения своих регистрационных данных для осуществления публикации в журнале (имя, фамилия, отчество, адрес автора, контактный телефон и e-mail приводятся в регистрационной форме, заполняемой авторами при отправке статьи в журнал). Обработка осуществляется редакцией журнала для целей надлежащей отправки журнала автору и возможности связи с автором лиц, заинтересованных в результатах труда автора статьи. Под обработкой персональных данных в контексте настоящего согласия понимаются действия редакции по сбору, систематизации, накоплению, хранению, использованию, распространению, уничтожению персональных данных, а также действия по их дальнейшей обработке с помощью автоматизированных систем управления базами данных, и иных программных средств, используемых редакцией журнала. Настоящее согласие автора на обработку персональных данных является бессрочным и может быть отозвано в любой момент путем отказа автора от получения журнала и дальнейшей обработки его персональных данных.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Н А У Ч Н О - Т Е Х Н И Ч Е С К И Й В Е С Т Н И К П О В О Л Ж Ь Я

№7 2025

Направления:

1.2.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ (технические науки)
2.3.1. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ (технические науки)
2.3.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ (технические науки)
2.3.5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ (физико-математические науки)
2.3.5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН, КОМПЛЕКСОВ И КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ (технические науки)
2.3.6. МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ, ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ (физико-математические науки)

www. ntvprt.ru

Реестровая запись от 08.05.2019 серия ПИ № ФС 77 -75732
Подписано в печать 28.07.2025 Формат А4. Печать цифровая.
Дата выхода в свет 28.07.2025
16,7 усл.печ.л. 18,4 уч.изд.л. Тираж 500 экз. Заказ 7551.

Учредитель: ООО "Рашин Сайнс":
420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул.Университетская, 22, помещение 23.
Адрес редакции, издательства, типографии – ООО "Рашин Сайнс":
420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул.Университетская, 22, помещение 23.
Цена свободная.

© Рашин Сайнс
тел. (843) 216-30-35
Отпечатано с готового оригинал-макета
ООО «Рашин Сайнс»