МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении

«КомТех-2025»

Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием

Ростов-на-Дону – Таганрог
Издательство Южного федерального университета
2025

УДК 004:[001+62+005](063)
ББК 32.973-018.2+32.81я43
К63

Ответственный редактор
С. И. Клевцов

К63 Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2025»: материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2025. - 492 с.

ISBN 978-5-9275-5018-0

В настоящее издание вошли доклады по материалам Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О. Н. Пьявченко «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении», рекомендованные к опубликованию Оргкомитетом.

В сборник материалов конференции вошли доклады, посвященные методам, моделям и алгоритмам обработки информации, методам, системам и средствам обработки и моделирования физических сигналов, полей и процессов, авиационным системам, технологиям беспилотных летательных аппаратов, современным микро- и наноэлектронным системам и технологиям, системам связи и навигации, контролю и управлению в технических системах, системам диагностики, инфокоммуникационным технологиям, вопросам промышленного дизайна, компьютерным технологиям в инженерной подготовке, проблемам мехатроники и робототехники.

Доклады могут быть интересны научным работникам, преподавателям, инженерам и студентам, специализирующимся в применении компьютерной обработки информации в различных областях деятельности человека.

ISBN 978-5-9275-5018-0
УДК 004:[001+62+005](063)
ББК 32.973-018.2+32.81я43

© Южный федеральный университет, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Секция - Методы, модели и алгоритмы обработки информации

Анферова Маргарита Сергеевна, Белевцев Андрей Михайлович
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРАТЕГИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ.... 14

Коцаба Евгений Васильевич, Яценко Дмитрий Владимирович
АЛГОРИТМ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АТАК ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НА ЛИЦЕВУЮ БИОМЕТРИЮ 20

Михник Дарья Романовна, Яценко Дмитрий Владимирович
МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ПАТТЕРНОВ МЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ..... 26

Федосов Валентин Петрович, Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М Джавад
УЛУЧШЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АДАПТАЦИИ В СИСТЕМАХ MIMO С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДОВ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК НА МОБИЛЬНЫХ И БАЗОВЫХ СТАНЦИЯХ 32

Юрченко Анастасия Юрьевна, Поленов Максим Юрьевич
РАСПОЗНАВАНИЕ ШТРИХ-КОДОВ ПРОДУКЦИИ НА КОНВЕЙЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕЙ 37

Панычев Андрей Иванович, Максимов Александр Викторович
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА КОМПЕНСАЦИИ ТРАЕКТОРНЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ В ГИДРОЛОКАТОРЕ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ 42

Маркович Игорь Ильич, Панычев Андрей Иванович, Бугаев Сергей Александрович, Завтур Евгений Евгеньевич, Козленя Сергей Николаевич, Насыров Владимир Гумерович
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОГО ФОРМИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ МНОГОЛУЧЕВОГО ЭХОЛОТА С ПРИЕМНОЙ ДУГОВОЙ АНТЕННОЙ..... 50

Проскуряков Александр Викторович
РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ НА БАЗЕ СИСТЕМНО-ИНФОРМАЦИОННОГО ПОДХОДА 58

Цветков Федор Алексеевич
ОБ ОПЫТЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ LMS-АДАПТИВНОГО КОРРЕКТОРА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА ЯЗЫКЕ LABVIEW 67

Проскуряков Александр Викторович,
Проскуряков Алексей Александрович
РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОГО ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПНЕВМОНИЙ НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GRAD-CAM++..... 71

Галиев Данияр Ильнурович
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ..... 77

Волощук Вадим Игоревич, Гаджиев Тимур Эфлетдинович, Боваев Арслан Батырович, Пашковский Руслан Юрьевич, Шушарина Мария Аркадьевна, Мячина Юлия Андреевна, Калашникова Татьяна Григорьевна
РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ, АДАПТАЦИИ И ВЕРСИОНИРОВАНИЯ ОНЛАЙН-КУРСОВ НА ОСНОВЕ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ СЕМАНТИЧЕСКОГО ПОИСКА 82

Гушанский Сергей Михайлович, Потапов Виктор Сергеевич
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С УЧИТЕЛЕМ..... 90

Леонова Антонина Валерьевна, Синютин Сергей Алексеевич
ОТЛАДКА МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА GNU-RADIO 96

Никитин Евгений Павлович, Калюжная Софья Евгеньевна, Кряжев Артем Иванович, Зубанев Родион Сергеевич, Галова Мария Константиновна
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ НА НЕПОЛНЫХ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ГРАФАХ..... 102

Зинченко Юрий Евгеньевич, Зинченко Татьяна Анатольевна
РАСПОЗНАВАНИЕ И АДАПТИВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ТЕСТОВ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ 109

Данилова Ирина Игоревна
АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЛЕСНЫХ ПОРОД ПО МАЛЫМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫМ ПАТЧАМ SENTINEL-2 116

Колесова Кира Алексеевна, Леонова Антонина Валерьевна, Шпаковская Оксана Юрьевна
РАЗРАБОТКА IOT- УСТРОЙСТВА "УМНАЯ КЛЕТКА ДЛЯ ПТИЦ" .. 121

Удод Евгений Васильевич
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ОЦЕНКЕ СУММАРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ВСТРАИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ 127

Akshay V. Kshirsagar, Dr. Ratnadeep R. Deshmukh, Ankush S.Chavan
STUDY OF DIFFERENT TECHNIQUES FOR WATER SURFACE AREA CALCULATION OF WATER RESERVIOR BY USING REMOTE SENSING AND GIS 133

Секция – Методы, системы и средства обработки и моделирования физических сигналов, полей и процессов

Арзуманян Грайр Вагаршакович, Юрченко Андрей Дмитриевич
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЖАТИЯ ВОЗДУХА 143

Кулявец Вячеслав Олегович, Москалёв Эдуард Константинович
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХЛОПАСТНОГО РОТОРА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ENGEE 148

Майдаченко Владислав Владиславович
РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ 153

Калюжная Софья Евгеньевна, Никитин Евгений Павлович, Галова Мария Константиновна
ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В GNU RADIO 159

Кокунин Петр Анатольевич, Егоров Дмитрий Владимирович
СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ И АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО СТАНДАРТУ ANSI/CTA-2034A..... 165

Алябьев Сергей Игоревич, Кисель Наталья Николаевна
ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ РЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК 171

Белик Владимир Андреевич, Кисель Наталья Николаевна
ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ПОГЛОТИТЕЛЬ ШАХТНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛА 175

Богатов Николай Маркович, Володин Владимир Сергеевич, Григорьян Леонтий Рустемович, Коваленко Максим Сергеевич
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КРЕМНИЕВОЙ N-I-P НАНОСТРУКТУРЕ..... 180

Ваганова Анастасия Алексеевна, Кисель Наталья Николаевна, Панычев Андрей Иванович
РЕКОНФИГУРИРУЕМАЯ МИКРОПОЛОСКОВАЯ АНТЕННА ДЛЯ УСТРОЙСТВ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ..... 186

Фархуд Азхар Кадим, Абу Хамдан Низар
ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ .. 191

Секция – Системы мониторинга, диагностики и управления

Марков Дмитрий Александрович
ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЗАЩИТЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОТ АТАК ВИРУСОВ-ШИФРОВАЛЬЩИКОВ 198

Эмилбек уулу Арслан, Кадыркулова Кыял Кудайбердиевна, Иманакунова Нуржан Тилековна
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ 204

Хлуденев Александр Владимирович
СИНХРОНИЗАЦИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ЧАСОВ В ПЕРИФЕРИЙНЫХ УЗЛАХ СЕТИ SPACEWIRE 210

Маткалыков Медербек Нооманжанович,
Иманакунова Нуржан Тилековна,
Кадыркулова Кыял Кудайбердиевна
СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СЕРВЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GO 215

Криницин Павел Геннадьевич
СИСТЕМА АДАПТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПЕЧИ ПРОКАЛИВАНИЯ НЕФТЯНОГО КОКСА 220

Трофимычев Илья Игоревич
КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ КОМПРОМЕТАЦИИ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ 225

Горобцов Александр Сергеевич, Данилевич Владислав Максимович,
Зубко Михаил Вадимович, Щербов Роман Михайлович,
Климов Константин Владимирович,
Сафонова Наталья Константиновна
МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА С УПРУГИМИ ЗВЕНЬЯМИ В ОБОЛОЧКЕ FRUND 230

Убейко Сергей Александрович, Колесова Кира Алексеевна,
Бабцов Семен Валентинович
КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕПЛИЧНАЯ СИСТЕМА (КАТС) 236

Преображенский Андрей Петрович, Клименко Юрий Алексеевич,
Фирсова Екатерина Александровна, Телегина Виктория Олеговна
УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА НА ПРЕДПРИЯТИИ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДУЛЯ 242

Карпова Екатерина Дмитриевна, Суров Александр Иванович,
Фирсова Анна Максимовна
ЦИФРОВИЗАЦИЯ ОВЦЕВОДСТВА: ПЕРСПЕКТИВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ 248

Батычко Николай Николаевич
МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОРГАНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ 254

Кузьмин Кирилл Андреевич
СИСТЕМА ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ..... 263

Кузьмин Евгений Всеволодович, Тимохин Никита Александрович
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ ГНСС РЕФЛЕКТОМЕТРИИ С ПОМОЩЬЮ БЮДЖЕТНОГО НАВИГАЦИОННОГО ПРИЕМНИКА 268

Пьявченко Алексей Олегович, Саксыкова Айтана Олеговна
К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА В ТЕПЛИЦЕ.. 273

Секция – Системы связи и навигации, авиационные системы и технологии

Косак Роман Эдуардович
КОМПАКТНЫЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ВИВАЛЬДИ 280

Бугаев Сергей Александрович, Гайно Евгений Владимирович, Пивнев Петр Петрович, Цветков Федор Алексеевич, Дикарева Елена Вячеславовна, Грицаенко Павел Григорьевич
ПОДВОДНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ МАЯК КАК АВАРИЙНОЕ РЕГИСТРИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ВОЗДУШНОГО СУДНА 286

Асовский Валерий Павлович, Кузьменко Алла Сергеевна, Асовский Алексей Валериевич
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СНОСА ПРИ ОПРЫСКИВАНИИ БЕСПИЛОТНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ СУДАМИ.. 292

Сердюков Владимир Владимирович,
Коротков Константин Станиславович, Строганова Елена Валерьевна, Голан Антон Васильевич
РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕКТОРНОГО ВОЛЬТМЕТРА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОГО РАДИОУСТРОЙСТА PLUTO+.. 299

Секция – Современные микро- и наноэлектронные системы и технологии

Нагаенко Александр Владимирович, Мальцев Максим Михайлович
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА 306

Сергеенко Марсель Алексеевич, Жук Алексей Андреевич, Прокопенко Николай Николаевич
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДНОГО КАСКАДА ДЛЯ GAAS ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ 311

Жук Алексей Андреевич, Клейменкин Дмитрий Владимирович
СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЙ МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ СОБСТВЕННОГО ТОКОПОТРЕБЛЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ КЛАССИЧЕСКИХ ВЫХОДНЫХ КАСКАДОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ 317

Пленингер Максимилиан, Балакирев Сергей Вячеславович, Солодовник Максим Сергеевич
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1.3 МКМ В ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ С КОНФИГУРАЦИЕЙ ВОЛНОВОД-МИКРОРЕЗОНАТОР 323

Калмыков Рустам Мухамедович
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 330

Завьялов Дмитрий Викторович, Конченков Владимир Игоревич, Полянский Евгений Олегович, Шеин Данила Валерьевич
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ГРАФЕН-ФОСФОРЕН-ГРАФЕН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛОВЫХ ПОЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ 336

Мараховский Михаил Алексеевич, Иванова Елена Викторовна
ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ УСКОРЕННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ СВОЙСТВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ 342

Панич Евгений Анатольевич
ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ, ФОРМИРУЕМЫХ НА ОСНОВЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФАЗ КИСЛОРОДНО-ОКТАЭДРИЧЕСКОГО ТИПА 347

Секция – Промышленный дизайн и компьютерные технологии в инженерной подготовке

Клевцов Сергей Иванович
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВИДОВ КОНТАКТНЫХ ЗАНЯТИЙ НА КАЧЕСТВО ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ В ОБЛАСТИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ 356

Цыганкова Маргарита, Барвенко Виктория Ивановна, Гривцов Владимир Владиславович
ДИЗАЙН СБОРНИКА ИЗБРАННЫХ ПРОИЗВЕДЕНИЙ ТУМАСА ТРАНСТРЁМЕРА «ВЗАИМОСВЯЗИ» 362

Секция – Инфокоммуникационные технологии

Слепов Владислав Александрович, Чикрин Дмитрий Евгеньевич
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ НОТ И НОТНЫХ ГРУПП В ЗАШУМЛЕННОЙ АУДИОЗАПИСИ 370

Киливник Виталий Вадимович
РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЧЕБНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СТУДЕНЧЕСКОМ СООБЩЕСТВЕ 376

Козина Инна Сергеевна
ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННОЙ 382

Нагорный Владимир Александрович
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОГО РАДИОПРИЕМНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРАТУРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ В КВ ДИАПАЗОНЕ 387

Цыпцова Арина Витальевна, Черников Дмитрий Юрьевич
ВИРТУАЛИЗАЦИЯ СЕТЕВЫХ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ НАГРУЗОК 393

Моисеенко Иван Евгеньевич
ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УСТОЙЧИВЫХ РЕКУРСИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ С КОНЕЧНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ХОГЕНАУЭРА 397

Кваша Андрей Александрович
РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ С ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТЬЮ И ГЕЙМИФИКАЦИЕЙ ДЛЯ МОТИВАЦИИ И СОПРОВОЖДЕНИЯ СПОРТИВНЫХ ТРЕНИРОВОК ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ 403

Радыгина Татьяна Сергеевна, Радыгин Руслан Евгеньевич
ВАРИАНТЫ ОРГАНИЗАЦИИ АБОНЕНТСКОГО ДОСТУПА К SOFTSWITCH ASTERISK 409

Тимошенко Данил Александрович
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА ВЫХОДЕ ЦИФРОАНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА БАЗЕ ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ RASPBERRY PI PICO 414

Максименко Алексей Сергеевич, Поленов Максим Юрьевич
АРХИТЕКТУРА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО СБОРКЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКИ 420

Марьев Александр Александрович
МЕТОД ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ СКАЛЯРНОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ СИГНАЛОВ 426

Белый Иван Сергеевич
ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМЫЙ РАДИОПЕРЕДАТЧИК КВ ДИАПАЗОНА С КВАДРАТУРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРА 432

Пилипенко Александр Михайлович
МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ СИМУЛЯТОРА NETSIM 438

Пьявченко Алексей Олегович, Лудищев Данил Сергеевич
ПРИМЕНЕНИЕ SOPC-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ УСТРОЙСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ В ЦИФРОВОМ ВИДЕОПОТОКЕ 444

Секция – Беспилотные транспортные платформы и системы

Хуссейн Фирас Айманович, Костюков Владимир Александрович
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ* 451

Тимершин Булат Айратович
НИЗКОУРОВНЕВАЯ РАЗРАБОТКА РЕТРОФИТ-КОМПЛЕКТА ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ТРАКТОРА: РЕАЛИЗАЦИЯ БАЗОВОЙ СЕНСОРИКИ И КОММУНИКАЦИИ НА ПРИМЕРЕ МТЗ–112Н–01 ... 457

Чикрин Дмитрий Евгеньевич, Галиуллин Искандер Гаязович, Густов Егор Сергеевич, Тимершин Булат Айратович, Пашин Дмитрий Михайлович, Шиндор Ольга Владимировна
СТРУКТУРНЫЕ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ДВУХУРОВНЕВОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ 463

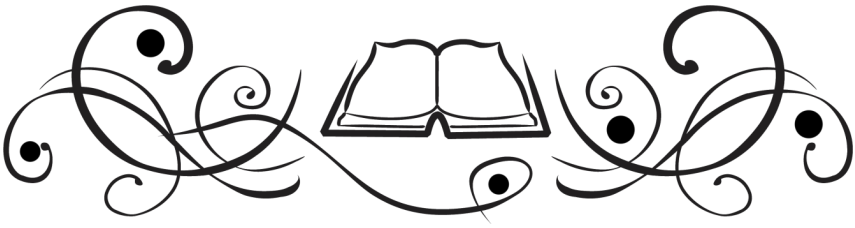
Мурин Ян Сергеевич
ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ КЛАССА МИКРО 469

Абдрахманов Шарифжан Ришатович
ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ МАЛОГАБАРИТНЫХ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БПЛА 474

Кокунин Петр Анатольевич, Хурматуллин Даниф Фанилевич
АЛГОРИТМЫ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ПЛАТФОРМАМИ НА ПРИМЕРЕ РОБОТА-СУМО 479

Шабернев Глеб Владимирович, Чикрин Дмитрий Евгеньевич, Галиуллин Искандер Гаязович
МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ПРИБЛИЖЕНИЯ ЗАШУМЛЁННЫХ ДАННЫХ ПОВЕРХНОСТЬЮ ВТОРОГО ПОРЯДКА 485

Секция
Методы, модели и алгоритмы обработки информации



УДК 004.46

Анферова Маргарита Сергеевна, Белевцев Андрей Михайлович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРАТЕГИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Скорость изменений в инновационном развитии экономики постоянно возрастает, особенно в высокотехнологичных областях. В этой связи задача проведения постоянного динамического мониторинга, выделение значимых технологий и стратегического анализа направлений развития науки и технологий приобретает исключительно важное значение.

В настоящее время данная работа не автоматизирована и требует значительных финансовых и временных затрат. Возникает необходимость разработки методики, позволяющей оптимально формировать стратегические направления развития технологий с учетом множества факторов, таких как глобальные тренды, внутренние ресурсы и потребности рынка.

В работе проведен анализ основных проблем построения процедур мониторинга и выявления зарождающихся технологий, формирования и развития технологических трендов.

Ключевые слова: мониторинг, системы мониторинга, тенденции развития, анализ.

Anferova Margarita Sergeevna, Belevtsev Andrey Mikhailovich,

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR FORMING STRATEGIC DIRECTIONS FOR TECHNOLOGY DEVELOPMENT

The rate of change in the innovative development of the economy is constantly increasing, especially in high-tech areas. In this regard, the task of conducting continuous dynamic monitoring, identifying significant technologies and strategic analysis of the directions of science and technology development is becoming extremely important. Currently, this work is not automated and requires significant financial and time costs. There is a need to develop a methodology that allows optimal formation of strategic directions for technology development, taking into account a variety of factors such as global trends, internal resources and market needs. The paper analyzes the main problems of building monitoring procedures and identifying emerging technologies, the formation and development of technological trends.

Keywords: monitoring, monitoring systems, development trends, analysis.

Введение

Решение задач автоматизации процесса определения трендов связано с разработкой и использованием формализованных процедур и статистических методов исследования текстов научных публикаций, патентов и коллекций научно-технологических документов. Однако, в связи с высокой динамикой изменений, библиометрического и лингвистического анализа недостаточно для формирования трендов развития.

Осуществление новой технологической разработки может занимать несколько лет. В этой связи необходимо, чтобы к моменту завершения разработки цель проекта оставалась по-прежнему актуальной, а достигнутые параметры имели конкурентные преимущества.

Для решения этих задач требуется разработка комплексной методики, включающей:

– автоматизированный сбор и обработку данных из разнородных источников,

– анализ государственных и корпоративных программ развития,

– создание информационно-аналитических систем обработки данных, которые позволят из открытых или закрытых источников выделять технологии, и интерпретировать их,

– прогнозирование технологических сдвигов и точек перелома,

– оценку возможностей интеграции новых технологий в существующие производственные и научные системы.

Достижение поставленных задач невозможно без понимания эволюции технологий и технических решений во времени и прогнозирования их новых параметров качества.

В работе рассматривается методика выявления зарождающихся технологий и формирования технологических трендов. Методика учитывает наличие характеристик трендов, взаимосвязей отдельных технологий и тип тренда.

Определены основные этапы формирования новых технологий. Выделены характеристики и основные критерии нового тренда. Предложена классификация типов новых трендов. Для заданных предметных областей предложен алгоритм формирования и анализа характеристик технологического тренда.

Основная часть

Разработка методики формирования стратегических направлений развития технологий включает в себя несколько ключевых этапов, каждый из которых требует тщательного анализа и планирования.

ЭТАП 1. Определение целей мониторинга

Цель мониторинга зависит от организации, инициирующей процесс:

1. Международные организации – выработка глобальных стандартов, координация научно-технологической политики, формирование совместных программ.
2. Государственные учреждения – оценка конкурентных преимуществ страны, обеспечение национальной безопасности, стратегическое планирование.
3. Университеты и исследовательские центры – анализ новых направлений для научной деятельности и коммерциализации технологий.
4. Корпорации и частные компании – адаптация к рыночным изменениям, поиск прорывных технологий для усиления конкурентоспособности.

5. Консалтинговые компании – предоставление аналитических данных для бизнес-стратегий.

ЭТАП 2. Анализ макро- и микросреды выбранной предметной области.

Основными объектами мониторинга выступают:

- Государственные программы (нацпроекты, ФЦП, ведомственные инициативы).
- Корпоративные стратегии (ТНК, промышленные альянсы).
- Региональные и международные программы технологического развития.
- Альтернативные источники (новости, конференции, инвестиционные тренды).

ЭТАП 3. Применение информационно-аналитических систем

В связи с высокой динамики изменений и не структурированностью данных необходим автоматизированный анализ с использованием: систем интеллектуального поиска, методов машинного обучения и искусственного интеллекта, алгоритмов прогнозной аналитики.

Результатом является формирование следующих технологических трендов:

- Актуальные технологические тренды– активно развивающиеся направления.
- Прорывные технологические тренды – способные радикально изменить рынки.
- Зарождающиеся технологические тренды – перспективные, но еще не получившие массового распространения.

ЭТАП 4. Выявление ключевых технологических направлений

Основной задачей на данном этапе является выявление:

1. Выявление направлений фундаментальных и поисковых исследований, методов и способов, как основы для создания технологий нового поколения.
2. Выявление зарождающихся замещающих технологий приводящих к формированию новых рынков (разрушающих инноваций).
3. Определение критических точек т.е. прогноз момента времени, когда это замещение произойдёт.
4. Выявление зарождающихся новых функциональных технологий и технологический направлений, способных кардинально изменить функциональные возможности и технические характеристики технических решений, создаваемых на их основе. (полностью менять структуру рынков - разрушающие инновации).
5. Выявление зарождающихся направлений создания технических решений на базе новых функциональных технологий (инновационных продуктов), способных полностью менять структуру рынков -разрушающие инновации).
6. Выявление инновационных продуктовых, процессных, организационных и маркетинговых технологий.
7. Выявление технологических направлений для широкого междисциплинарных спектра областей применения.

8. Выявление требуемых компетенций для участия в программах перспективных направлений

9. Анализ внешних ограничений и воздействий на предметную область и проекты рассматриваемого предприятия.

10. Оценка возможности участия в выбранных проектах на базе существующих компетенций и технологического базиса рассматриваемого предприятия, в том числе и в условиях внешних ограничений.

На основе выявленных проблем и требований в настоящей работе предлагается комплексная методика интеллектуального мониторинга технологических трендов, адаптированная к условиям высокотехнологичных отраслей (Рисунок 1). Методика направлена на построение многоуровневой системы анализа, включающей в себя этапы агрегации данных, векторизации, построения графа знаний, генерации аналитических заключений и формализации трендов с последующей их интеграцией в процессы стратегического планирования предприятия.

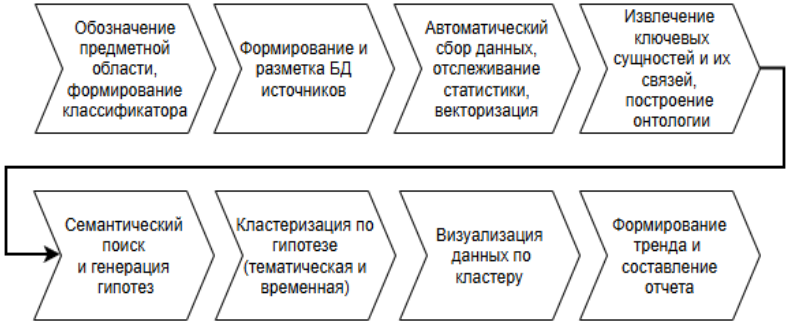


Рис1. Общая методика формирования технологических трендов

Представленная методика отражает логику поэтапного преобразования необработанных текстовых данных в формализованные технологические тренды, снабжённые семантической интерпретацией, динамикой развития и аргументированной верификацией. В результате такого подхода становится возможным не только фиксировать текущее состояние научно-технического ландшафта, но и выявлять потенциальные направления его трансформации, что особенно важно для высокотехнологичных предприятий, функционирующих в условиях высокой информационной неопределённости.

Сложность реализации задач мониторинга обусловлена высокой ресурсоемкостью автоматизированных подходов при их распространении на целый спектр технологических областей. Высокая интенсивность изменения и объемы информационного пространства требует создания новых методов обработки и анализа информации. Решение данной задачи невозможно без применения автоматизированных информационно-аналитических систем,

оснащенных специальными поисковыми сервисами с применениями методов искусственного интеллекта.

Данные сервисы повысят доказательность и эффективность мониторинга технологических трендов.

Выводы

Разработка методики формирования стратегических направлений развития технологий является сложным и многогранным процессом, который требует комплексного подхода и использования различных методов и инструментов стратегического планирования.

Важно учитывать как глобальные технологические тренды, так и локальные особенности, ресурсы и потребности общества.

Тщательно продуманная и грамотно реализованная методика позволит эффективно управлять технологическим развитием, обеспечивая конкурентоспособность и устойчивое развитие в будущем.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на совершенствование алгоритмов искусственного интеллекта для повышения точности прогнозов и адаптации методики под конкретные отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анферова М.С., Белевцев А.М. Дворецкий В.В. Методика определения и анализа технических характеристик технологических трендов // Известия ЮФУ. Технические науки. № 1 (243). 2025 г

2. Анферова М.С., Белевцев А.М. Дворецкий В.В. Методика и структурно-функциональная организация системы мониторинга научно-технической информации для определения направлений развития высокотехнологичных предприятий // Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «КомТех-2024»

3. Анферова М.С., Белевцев А.М. Анализ направлений создания алгоритмов эффективного поиска информации в сетях общего и специального назначения //Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства» /Рязань: РГРТУ, 2018

4. Белевцев А.М., Садреев Ф.Г., Белевцев А.А., Балыбердин В.А. Разработка интеллектуальных сервисов мониторинга технологических трендов в информационно-аналитических комплексах // Статья в российском журнале из перечня ВАК. Наукоемкие технологии т. 20 №3 2019г с. 24-29.

5. Анферова М.С., Белевцев А.М. Разработка алгоритмов интеллектуального сервиса поиска и мониторинга информации // Известия ЮФУ. Технические науки. №3 2021г с 6 - 17.

6. Анферова М.С., Белевцев А.М. Анализ требований и разработка алгоритмов интеллектуальных сервисов мониторинга // Известия ЮФУ. Технические науки. №3 2022г с 119 - 129.

7. Белевцев А.А., Белевцев А.М., Балыбердин В.А. Методика анализа и оценки приоритетов технологических трендов и технологий. Известия ЮФУ» № 6, 2022 г

8. Анферова М. С., Белевцев А. М. Анализ направлений развития технологий мониторинга в условиях большого объёма неструктурированной информации // XXIV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко // ”Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении” «КомТех-2020»

9. Белевцев А.М., Балыбердин В.А., Белевцев А.А. Методика оценки времени и стоимости реализации технологических трендов в условиях неопределенности и не полноты информации // НТ №5 2019

10. Анферова М.С., Белевцев А.М., Белевцев А.А., Методика анализа развития зарождающихся технологий и технологических фронтов //Известия ЮФУ. Технические науки. №4 2023г с 87 - 96.

Автор: Анферова Маргарита Сергеевна, старший преподаватель, «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, 125993, телефон: +7 905 522-07-49, e-mail: gludkina@yandex.ru

Белевцев Андрей Михайлович, доктор технических наук, профессор, «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, 125993, телефон: +7 903 769-17-88, e-mail: ambelevtsev@yandex.ru

Author: Anferova Margarita Sergeevna, senior lecturer, Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia, Moscow, Volokolamskoe shosse, 4, 125993, phone: +7 905 522-07-49, e-mail: gludkina@yandex.ru

Belevtsev Andrey Michailovitch, doctor of science, professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Russia, Moscow, Volokolamskoe shosse, 4, 125993, phone: +7 903 769-17-88, e-mail: ambelevtsev@yandex.ru

004.852

Евгений Васильевич Коцаба
Дмитрий Владимирович Яценко

АЛГОРИТМ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АТАК ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НА ЛИЦЕВУЮ БИОМЕТРИЮ

Аннотация. В работе рассмотрены современные угрозы систем лицевой биометрии, вызванные атаками представления, и предложен алгоритм их предотвращения. Проведён анализ существующих подходов к обнаружению презентационных атак, описаны этапы разработки ансамблевой модели на основе методов машинного обучения и каскадного детектирования. Экспериментальная оценка показала, что предложенный алгоритм обеспечивает точность распознавания до 0,85 на тестовых выборках. Предложенные решения позволяют повысить надёжность биометрических систем и могут быть интегрированы в реальные приложения.

Ключевые слова: атака представления, лицевая биометрия, антиспуфинг, машинное обучение, каскад Хаара.

Evgeny Vasilievich Kotsaba
Dmitry Vladimirovich Iatsenko

ALGORITHM FOR PREVENTING ATTACKS ON FACIAL BIOMETRICS

Abstract. The paper addresses presentation attacks on facial biometric systems and proposes an algorithm to prevent them. We analyze current presentation attack detection methods, develop an ensemble model combining machine learning and cascade detection, and evaluate its performance. Experiments demonstrate that the proposed algorithm achieves up to 0.85 accuracy on test datasets. The approach enhances the security of biometric systems and can be integrated into real-world applications.

1) *Keywords: presentation attack, facial biometrics, antispoofing, machine learning, Haar cascade.*

Введение

В последние годы методы идентификации личности по лицевой биометрии стали широко применяться в различных сферах: от контроля доступа на предприятия до финансовых и медицинских сервисов [1]. Однако устойчивость таких систем к атакам представления (presentation attacks) остаётся серьёзной проблемой безопасности, поскольку злоумышленники могут использовать фотографии, видео или маски для обхода распознавания [2], [3]. Цель данной работы — разработать алгоритм предотвращения атак представления на системы лицевой биометрии, сочетающий преимущества традиционных и современных методов детектирования.

Для достижения цели ставились следующие задачи:

1) Проанализировать принципы работы систем лицевой биометрии и существующие методы противодействия презентационным атакам.

2) Разработать архитектуру алгоритма, объединяющую несколько подходов к детектированию фальсификаций.

3) Реализовать и обучить модели на основе машинного обучения и каскадных детекторов.

4) Провести экспериментальную оценку эффективности предложенного алгоритма.

5) Теоретические сведения о лицевой биометрии и атаках представления

Эти задачи были успешно решены в рамках исследования. Результат работы был представлен в 2023 на всероссийском хакатоне по биометрии, в кейсе №3 Фронтальный алгоритм защиты от атак предъявления для лицевой биометрии от Сбербанк, в котром вышел в финал.

Принципы лицевой биометрии и атаки на нее.

Определение и принципы работы систем лицевой биометрии

Лицевая биометрия — это метод идентификации личности по уникальным физиологическим и поведенческим характеристикам лица, таким как структура черт, расстояние между ключевыми точками и текстура кожи [1]. Типовая система включает этапы захвата изображения, предварительной обработки (выравнивание, нормализация), выделения признаков и сравнения с шаблонами в базе данных [1].

Атаки представления и методы их обнаружения

Presentation attack (атака представления) заключается в попытке обмануть биометрическую систему с помощью неаутентичного носителя: фотографии, видеоэкранов или масок [3]. Применяются как классические методы обнаружения атак используют анализ текстуры (LBP, SURF, HOG-LPQ) и SVM-классификаторы [4] так и комплексные методы [11]. Современные подходы применяют глубинные нейронные сети (CNN) и многомодальные данные, включая инфракрасную или спектральную информацию [5], [6].

Разработка алгоритма предотвращения атак представления

Общая архитектура алгоритма

Предлагаемое решение по оюнаружению атак представлением, по сути является ансамблем из нескольких совершенно разных моделей, каждая из которых обучалачь на собранном датасете независимо. В процессе эксплуатации, каждая модель выдает результат предсказания наличия атаки как значение вероятности, и полученные значения от всех предикторов усредняются. При превышеннии некоторого порога, фиксируется атака.

Предложенный алгоритм сочетает три участника детектирования:

– детектирование фальсификаций по текстуре через ансамбль моделей RandomForest (Stacking RFC);

– одноступенчатое обнаружение объектов (лицо, маска) с помощью YOLOv5s6;

– каскадный анализ движений глаз и микровыражений с использованием Haarcascade.

Общая схема представлена на рисунке 1.

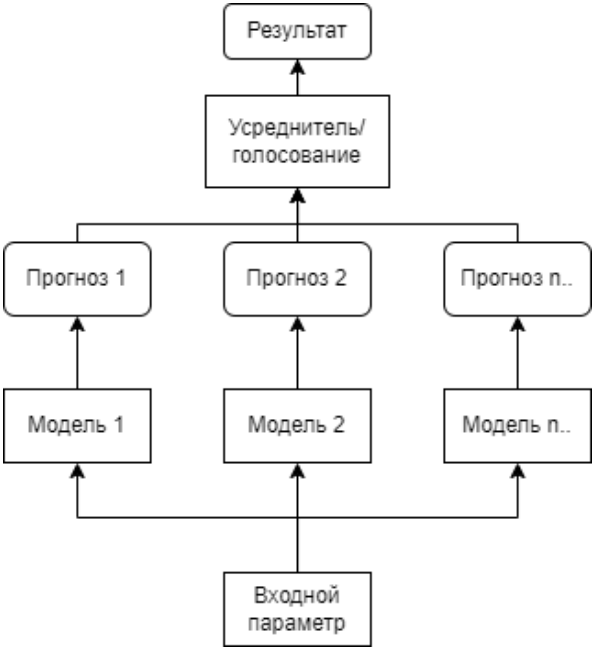


Рис. 1 Общая схема алгоритма

Далее рассмотрим каждого из участников ансамбля отдельно.

Ансамбль Stacking RandomForestClassifier

Метод основан на разделении изображения на четыре области (верхнюю, нижнюю, левую и правую) вокруг найденного лица и анализе каждой области отдельно, как показано на рисунке 2а [1]. Для каждой части извлекаются средние значения цветовых компонентов пикселей и обучаются четыре независимые модели RandomForestClassifier. Итоговый прогноз формируется голосованием подмоделей (hard voting) [1].

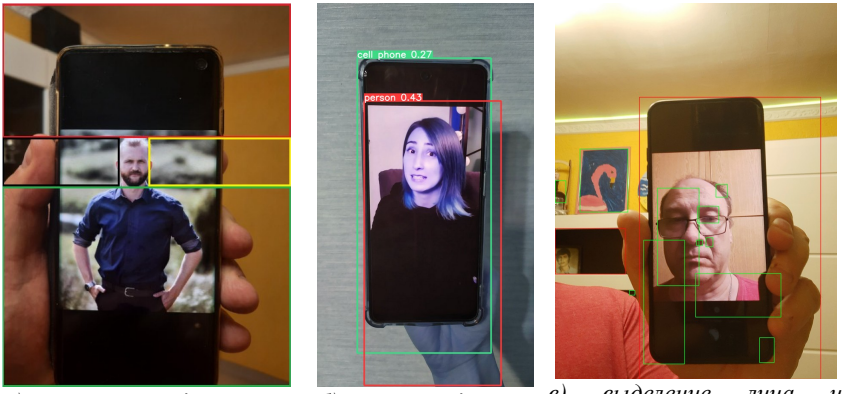
Модель детектирования YOLOv5s6

Данная одноступенчатая модель обеспечивает быстрое обнаружение объектов (лицо, телефон, экран) на изображении и позволяет выявлять признаки

атаки, такие как посторонние предметы перед и вокруг лица (фотография или устройство воспроизведения), как показано на рисунке 2б [2].

Каскадная модель Haarcascade

Используя каскадный классификатор Хаара для лица и глаз, алгоритм анализирует обнаруживает на фотографии лицо, и при помощи классических алгоритмов OpenCV обнаруживает прямоугольники [7], [8]. В случае, если лицо вписывается в прямоугольник, то фикисируется атака (см рисунок 2в).



а) четыре зоны для анализа StackingRandomForestClassifier

б) определение объектов Yolo

в) выделение лица и прямоугольников OpenCV

Рис. 2 Визуализация работы моделей ансамбля

Экспериментальная оценка

Описание датасета и методика обучения

Для обучения и тестирования использовался набор данных, включающий 315 изображений (160 с презентационными атаками, 155 — без), снятых в контролируемых условиях [1]. Изображения разделены на тренировочную (80%) и тестовую (20%) выборки.

Результаты и показатели качества

Основные метрики качества алгоритма на тестовой выборке представлены в таблице1.

Таблица 1

Метрики работы моделей.

Модель	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
RandomForestClassifier	0.82	0.826	0.826	0.826
Yolo	0.86	0.81	1	0.89
Haarcascade	0.8	0.818	0.783	0.8
Ансамбль	0.845	1	0.75	0.857

Модель Stacking RFC продемонстрировала точность 0,87, YOLOv5s6 — 0,84, Haarcascade — 0,67, тогда как объединённый алгоритм достиг 0,85. На рисунке 3 представлена матрица ошибок ансамбля.

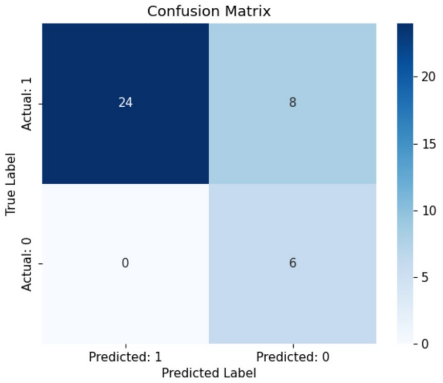


Рис 3. Матрица ошибок ансамбля.

Выводы

Проведённый анализ и экспериментальная проверка показали, что сочетание методов машинного обучения и каскадных детекторов позволяет значительно повысить устойчивость систем лицевой биометрии к атакам представления. Предложенный алгоритм обеспечивает точность распознавания на уровне 0,85 и может быть адаптирован под различные прикладные сценарии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коцаба Е.В. Алгоритм предотвращения атак представления на лицевую биометрию: магистерская диссертация. Ростов-на-Дону, 2025. – 48 с.

2. de Freitas Pereira T., Anjos A., De Martino J.M., Marcel S. Lbptop based countermeasure against face spoofing attacks // Computer Vision - ACCV 2012 Workshops. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2013. – P. 121–132.

3. Wang T., Yang J., Lei Z., Liao S., Li S.Z. Face liveness detection using 3D structure recovered from a single camera // Int. Conf. on Biometrics (ICB). – 2013. – P. 1–6. DOI:10.1109/ICB.2013.6612957.

4. Boulkenafet Z., Komulainen J., Hadid A. Face anti-spoofing using Speeded-Up Robust Features and Fisher Vector Encoding // IEEE Signal Processing Letters. – 2017. – Vol. 24, No. 2. – C. 244–248.

5. Денисова А. Ю., Федосеев В. А. Обнаружение атак на биометрическое предъявление на системы аутентификации лиц при помощи специальных устройств съёмки // Компьютерная оптика. — 2022. — Т. 46, № 4. — С. 612–620.

6. Taming Self-Supervised Learning for Presentation // [Электронный ресурс] // URL: https://arxiv.org/pdf/2109.04100 (дата обращения: 10.11.2024).

7. Explaining Face Presentation Attack Detection Using Natural Language // [Электронный ресурс] // URL: https://arxiv.org/pdf/2111.04862 (дата обращения: 06.01.2025).

8. Presentation Attack Detection in Face Recognition: A Survey // [Электронный ресурс] // URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00530-023-01070-5 (дата обращения: 17.02.2025).

9. Kim G. Face liveness detection based on texture and frequency analyses // Proc. Int. Conf. on Biometrics. – 2012. – P. 67–72.

10. Mohan K. Object face liveness detection with combined HOG local phase quantization using fuzzy SVM classifier. – 2017.

11. Kotenko, I., Saenko, I., Lauta, O., Vasiliev, N., Iatsenko. Attacks Against Machine Learning Systems: Analysis and GAN-based Approach to Protection. In: Proceedings of the Seventh International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’23). IITI 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 777. Springer, Cham.

Авторы: Коцаба Евгений Васильевич, ассистент, Институт высоких технологий и пьезотехники, ЮФУ, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова 10, 344090, телефон: +7(863)243-48-11, email: kocaba@sfedu.ru. Яценко Дмитрий Владимирович, ст. преподаватель каф. системного анализа, Институт высоких технологий и пьезотехники, ЮФУ, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова 10, 344090, телефон: +7(928)270-65-82, email: iatcenko@sfedu.ru

Authors: Evgeny Vasilievich Kotsaba, Assistant, Institute of High Technologies and Piezoengineering, Southern Federal University (SFedU), Russia, Rostov-on-Don, Milchakova Street 10, 344090, Phone: +7(863)243-48-11, Email: kocaba@sfedu.ru. Dmitry Vladimirovich Iatsenko, Senior Lecturer of the Department of Systems Analysis, Institute of High Technologies and Piezoengineering, Southern Federal University (SFedU), Russia, Rostov-on-Don, Milchakova Street 10, 344090, Phone: +7(928)270-65-82, Email: iatcenko@sfedu.ru.

УДК 004.89

Михник Дарья Романовна

Яценко Дмитрий Владимирович

МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ПАТТЕРНОВ МЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Аннотация. В работе представлены современные методы машинного обучения для анализа электромиографических (ЭМГ) сигналов и распознавания паттернов мышечной активности. Разработана система сбора и предобработки данных на базе микроконтроллера Arduino Uno и сухих биометрических датчиков, сформирован набор данных для классификации жестов (цифры 0–9). Предложена архитектура LSTM-модели с оптимизированными гиперпараметрами, достигшая точности 24,8 % на тестовой выборке на одном датчике. Полученные результаты демонстрируют применимость подходов глубокого обучения в биомедицинских приложениях управления протезами и интерфейсов жестового управления.

Ключевые слова: электромиография, ЭМГ, машинное обучение, LSTM, классификация.

Daria Romanovna Mikhnik

Dmitry Vladimirovich Iatsenko

MACHINE LEARNING MODELS FOR RECOGNIZING PATTERNS OF MUSCLE ACTIVITY

ABSTRACT. This paper presents modern machine learning methods for processing electromyographic (EMG) signals and recognizing muscle activity patterns. A data acquisition and preprocessing system based on Arduino Uno and dry biometric sensors is developed, and a dataset for classifying gestures (digits 0–9) is formed. We propose an LSTM-based architecture with optimized hyperparameters, achieving 24.8 % accuracy on the test set on a single sensor. The results demonstrate the applicability of deep learning approaches in biomedical applications for prosthesis control and gesture-based interfaces.

Keywords: electromyography, EMG, machine learning, LSTM, classification.

Введение

Электромиография (ЭМГ) используется для регистрации биоэлектрических потенциалов мышц и их анализа в клинической и инженерной практике [1]. С развитием интеграционных технологий и человеко-машинных интерфейсов актуальным стало применение методов машинного обучения для распознавания сложных паттернов мышечной

активности, открывающее возможности управления экзоскелетами, бионическими протезами и системами жестового управления [6]. Часто для анализа жестов применяют методы оптического распознавания или анализа динамики движения пера [13]. Однако целью работы является разработка и исследование моделей машинного обучения для классификации ЭМГ-сигналов, соответствующих движениям (жестам) при написании цифр от 0 до 9.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1) Исследовать теоретические основы регистрации и обработки ЭМГ-сигналов. [2]

2) Рассмотреть современные подходы машинного обучения и нейронных сетей в анализе ЭМГ-данных. [4]

3) Реализовать аппаратно-программную систему сбора и предобработки данных.

4) Разработать и обучить LSTM-модель для классификации жестов. [9]

5) Провести экспериментальную оценку качества модели.

6) Теоретические основы регистрации и обработки ЭМГ-сигналов

Принципы электромиографии

ЭМГ представляет собой запись разницы электрических потенциалов, возникающих при сокращении мышечных волокон. Сигналы регистрируются при помощи сухих или гелевых электродов, соединённых с инструментальным усилителем и АЦП [2]. Поверхностная ЭМГ наиболее распространена благодаря неинвазивности.

Параметры сигнала и артефакты.

– Ключевые параметры измерений: амплитуда (0,1–5 мВ), частотный диапазон (10–500 Гц), латентность и скорость проводимости.
– Основные артефакты: сетевые наводки (50 Гц), движение кабеля и перекрестные помехи соседних мышц [3]. Для устранения артефактов применяют аналоговую фильтрацию и цифровые методы обработки (HP, LP, notch-фильтры).

Современные подходы машинного обучения для анализа ЭМГ

Ранее часто применялись классические методы. Особо эффективны методы извлечения признаков в временной (MAV, RMS, ZC, SSC) и частотной (MDF, MF) областях с последующей классификацией SVM и RandomForest [6]. Эти подходы обычно достигают точности 80–90 % на малых выборках.

Однако сегодня все чаще применяются методы на базе моделей глубоких нейронных сетей. CNN и гибридные архитектуры CNN-LSTM позволяют

автоматически извлекать пространственно-временные признаки из спектрограмм или сырых данных [7]. Метрики точности современных моделей таковы:

– CNN-LSTM достигает до 96,9 % точности при распознавании динамических жестов [11];

– Однонаправленный LSTM-классикатор показал 94,8 % точности на тестах [9].

Преимущества моделей на основе LSTM для ЭМГ, заключается в том что, LSTM способны учитывать долгосрочные зависимости и устойчивы к кратковременным помехам. Механизм ячеек с гейтами (input, forget, output) предотвращает затухание градиентов при обучении [7].

Аппаратно-программная система сбора и предобработки данных

Платформа Arduino и датчики.

Для регистрации ЭМГ-сигналов использовали Arduino Uno Rev3 и сухой трехэлектродный EMG Muscle Sensor V3.0 (диапазон ±1,5 мВ, усиление ×1000, фильтрация 20–500 Гц) [20, 30]. Схема подключения приведена на рисунке 1.

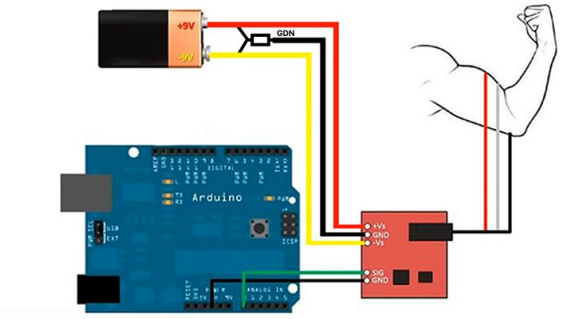


Рис. 1 Схема подключения системы датчиков

Методика сбора и синхронизации.

Данные считывались с частотой 1000 Гц, масштабировались в напряжение, передавались по Serial в CSV. Видео синхронизировали по меткам времени с помощью OpenCV. Итоговая выборка: 80 экспериментов с цифрами 0–9, размеченные интервалы жестов. Структурная схема конвейера сбора набора данных представлена на рисунке 2.

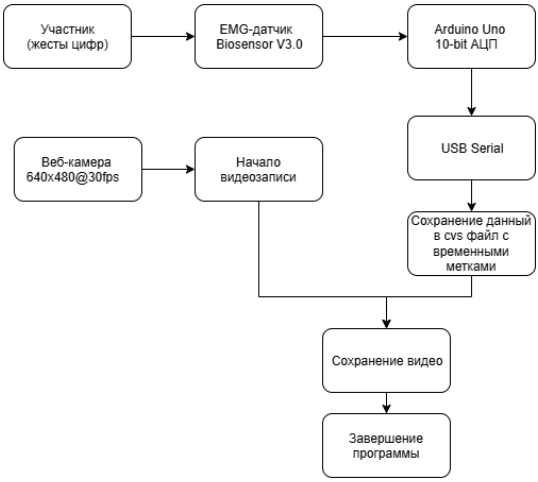


Рис. 2 Схема сбора данных

Предобработка и формирование набора данных - к сериям значений сигнала применяли min-max нормализацию, паддинг до максимальной длины последовательности для пакетной обработки. Метки классов преобразованы с помощью LabelEncoder.

Реализация и оценка LSTM-модели

Для анализа последовательностей сигналов, применяется архитектура модели Bi-LSTM с 3 слоями, 400 скрытых нейронов, Dropout 5 %, pack_padded_sequence для переменных длин последовательностей [9]. Выход — 10 классов, см. схему модели на рисунке 3.

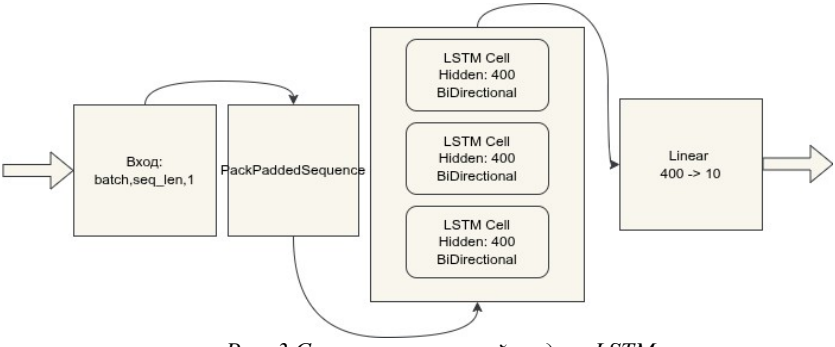


Рис. 3 Схема используемой модели LSTM.

В процессе обучения применялась функция потерь — cross-entropy, оптимизатор — AdamW (lr=1e-4, weight_decay=0,05). Обучение происходило на протяжении 50 эпох, со следующими гиперпараметрами: batch_size=16, стратифицированный split 70/30.

В процессе исследования были достигнуты следующие результаты - при оптимальных гиперпараметрах: hidden_size=400, num_layers=3, bidirectional=False, normalization=True, была получена точность на тесте — 22,8 %, F1-мера — 0,20. Снижение функции потерь стабильно до эпохи 45 [23].

Развитие технологий TinyML и внедрение ЭМГ-моделей на маломощных платформах подтверждено исследованиями [5], которые демонстрируют работоспособность на Arduino 33 BLE. Обзор современных подходов к распознаванию паттернов мышечной активности для протезирования [8] подчёркивает клиническую применимость разработанных методов. Кроме того, прогресс в применении глубоких моделей и инструментов для обработки естественного языка [10] и высокопроизводительной библиотеки PyTorch [12] обеспечивает гибкость и масштабируемость при разработке ЭМГ-моделей.

Выводы

Разработанный комплекс с моделью LSTM показал невысокую эффективность в распознавании ЭМГ-паттернов жестов (цифры 0–9), достигая точности 24,8 %. Это вызвано тем, что в сборе данных был задействован всего один датчик, который собирает данные только с основной приводящей мышцы кисти (m. adductor pollicis), которая задействуется почти в равной степени при написании любых символов. В дальнейших исследованиях запланировано увеличение количества датчиков, что добавит новые измерения в набор данных и увеличит точность работы. Предложенный аппаратно-программный комплекс на базе Arduino и сухого EMG-датчика обеспечивает сбор данных. Результаты открывают перспективы применения в управлении протезами и жестовых интерфейсах. Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию мультиканальных данных и адаптивных онлайн-методов обучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1.Preston D. C., Shapiro B. Electromyography and Neuromuscular Disorders: Clinical-Electrophysiologic Correlations. 3rd ed. Elsevier, 2013. – 656 p.

2. Stevenson W. G., Asirvatham S. Fundamental Concepts in Electrophysiology in Cases and Reviews. Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology. 2013 Dec; 6(6): e95–e100.

3. Lectures on Electromyography [Электронный ресурс] // Studfile. URL: https://studfile.net/preview/9546510/page:3/ (дата обращения: 15.11.2024).

4. Phinyomark P., Khushaba R. N., Scheme E. Feature Extraction and Selection for Myoelectric Control Based on Wearable EMG Sensors // IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2018. Vol. 26, No. 2. P. 1–10.

5. Implementation Of Tiny Machine Learning Models On Arduino 33 BLE For Gesture And Speech Recognition [Электронный ресурс] // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/362277135 (дата обращения: 05.11.2024).

6. Manjarres-Triana A., Acevedo-Serna J., Ramírez-Duque A. A., Jiménez M. F., Pulido-Herrera E., Villarejo Mayor J. J. Overview of Processing Techniques for Surface Electromyography Signals. arXiv preprint arXiv:2304.04098. 2023, 11 pp.

7. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory // Neural Computation. 1997. Vol. 9, No. 8. P. 1735–1780.

8. Scheme E., Englehart K. Electromyogram Pattern Recognition for Control of Powered Upper-Limb Prostheses: State of the Art and Challenges for Clinical Use // J. of Rehabilitation Research, 2011. Vol. 48(6): 643–660.

9. Graves A. Supervised Sequence Labelling with Recurrent Neural Networks. Springer, 2012. – 154 p.

10. Young T., Hazarika D., Poria S., Cambria E. Recent Trends in Deep Learning Based Natural Language Processing. IEEE Comput. Intell. Mag., 2018.

11. Li Qiyu, Langari Reza. EMG-based HCI Using CNN-LSTM Neural Network for Dynamic Hand Gestures Recognition. IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55, No. 37. Pp. 426–431.

12. Paszke A. et al. PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library. NeurIPS, 2019.

13. I. Saenko, O. Lauta and D. Iatsenko. The Use of Dynamic Characteristics in Handwriting Recognition Tasks. 2023 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2023, pp. 609-614

Авторы: Михник Дарья Романовна, ассистент, Институт высоких технологий и пьезотехники, ЮФУ, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова 10, 344090, телефон: +7(863)243-48-11, email: mihnik@sfedu.ru. Яценко Дмитрий Владимирович, ст. преподаватель каф. системного анализа, Институт высоких технологий и пьезотехники, ЮФУ, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова 10, 344090, телефон: +7(928)270-65-82, email: iatcenko@sfedu.ru

Authors: Darya Romanovna Mikhnick, Assistant, Institute of High Technologies and Piezoengineering, Southern Federal University (SFedU), Russia, Rostov-on-Don, Milchakova Street 10, 344090, Phone: +7(863)243-48-11, Email: mihnik@sfedu.ru. Dmitry Vladimirovich Iatsenko, Senior Lecturer of the Department of Systems Analysis, Institute of High Technologies and Piezoengineering, Southern Federal University (SFedU), Russia, Rostov-on-Don, Milchakova Street 10, 344090, Phone: +7(928)270-65-82, Email: iatcenko@sfedu.ru.

УДК 621.396

Федосов Валентин Петрович, Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М Джавад

УЛУЧШЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АДАПТАЦИИ В СИСТЕМАХ MIMO С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДОВ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК НА МОБИЛЬНЫХ И БАЗОВЫХ СТАНЦИЯХ

В этой статье обсуждается важность снижения ошибок в спутниковых, беспроводных и космических системах связи. В ней предполагается, что использование канального кодирования для обнаружения и исправления ошибок может помочь смягчить последствия перегруженных каналов передачи. В статье предлагается метод повышения устойчивости беспроводных систем связи к помехам путем внедрения кодов Рида-Соломона и адаптивных методов пространственно-временной обработки сигналов на приемнике. Адаптивная антенная решетка используется для обеспечения пространственной фильтрации в отражательных каналах со сложными схемами распространения сигнала. Результаты моделирования показывают значительное улучшение в исправлении ошибок для кодов Рида-Соломона, достигая усиления до 5 дБ на мобильных и базовых станциях. Адаптивный алгоритм также снижает вероятность ошибок и увеличивает пропускную способность. В статье также предполагается, что адаптивные пространственно-временные алгоритмы могут улучшить помехоустойчивость приемной системы в условиях многопутного распространения сигнала.

Ключевые слова: Режим канала 3GPP 3D, MIMO, BER, OFDM, WiMAX, многопутной, код Рида-Соломона, адаптивный алгоритм.

Fedosov Valentin Petrovich, Almusawi Wisam Mohammedtaqi M. Jawad

IMPROVEMENT OF SPACE-TIME ADAPTATION ALGORITHMS IN MIMO SYSTEMS USING ERROR CORRECTION CODES AT MOBILE AND BASE STATIONS

This paper discusses the importance of error reduction in satellite, wireless, and space communication systems. It suggests that using channel coding for error detection and correction can help mitigate the effects of congested transmission channels. The paper proposes a method to improve the robustness of wireless communication systems to interference by implementing Reed-Solomon codes and adaptive space-time signal processing techniques at the receiver. The adaptive antenna array is used to enable spatial filtering in reflective channels with complex signal propagation patterns. The simulation results show a significant improvement in error correction for Reed-Solomon codes, achieving a gain of up to 5 dB at mobile and base stations. The adaptive algorithm also reduces error probability and increases throughput. The paper also suggests that adaptive space-time algorithms can improve the noise immunity of the receiving system under multipath signal propagation conditions.

Keywords: 3GPP Channel Mode, MIMO, BER, Multipath, Reed-Solomon Code, Adaptive Algorhythm

Введение

коммуникация является фундаментальным процессом обмена информацией или установления соединения, или связи между двумя точками информации. Электронный аппарат, который используется для целей коммуникации, называется системой коммуникации. Одной из основных задач этой системы является передача сигнала-носителя информации от источника, расположенного в одном месте, к пользователю или приемнику, расположенному в другом месте на расстоянии [1-3].Стандарт BER часто используется для оценки эффективности передачи и хранения цифровых данных. Он чрезвычайно прост: отношение общего числа бит к числу бит с ошибкой Шум в среде передачи приводит к повреждению данных. Связь между сигналом и шумом описывается отношением сигнал/шум (SNR)[1, 4, 5]. В общем случае мощность сигнала/шума является определяющим фактором SNR, который обратно пропорционален BER [4, 6, 7]. Это означает, что качество связи улучшается по мере увеличения SNR и снижения результата BER. Обычно сигнал искажается в результате введения шума во время его прохождения через канал AWGN[8, 9]. Это может привести к существенной проблеме с точностью и эффективностью цифровой системы, поскольку он изменяет исходные биты сообщения. В результате необходимы методы обнаружения и исправления ошибок. Одним из методов смягчения ошибок коробки передач является оптимизация отношения Eb/No. Однако на практике это соотношение невозможно увеличить выше определенного уровня[7, 10, 11]. Это означает, что качество связи улучшается по мере увеличения SNR и снижения результата BER. Обычно сигнал искажается в результате воздействия шума во время прохождения через канал передачи. Это может привести к существенной проблеме с точностью и эффективностью цифровой системы, поскольку шум изменяет исходные биты сообщения. В результате необходимы методы обнаружения и исправления ошибок. Одним из методов смягчения ошибок коробки передач является оптимизация отношения сигнал/шум SNR. Однако на практике это соотношение невозможно увеличить выше определенного уровня.В данной работе исследован результат совмещения алгоритмов адаптации в системе MIMO и кодирования Рида-Соломона, что позволяет реализовать пространственную фильтрацию и уменьшение ошибок передачи битов в каналах с переотражениями при наличии сложной картины распространения сигнала в городских условиях.

Основная часть

MIMO - метод оценки канала OFDM для многопутных радиоканалов на базовой станции (BS) и мобильной станции (MS). В этом разделе представлены результаты исследования эффективности передачи данных WiMAX с использованием новейшей модели канала 3GPP 3D. Текущая частота 2,5 ГГц использовалась для калибровки приемных и передающих антенн с целью достижения необходимого беспроводного диапазона с умеренным затуханием сигнала. Ожидаемая производительность системы связи на высоте 25 метров и расстоянии около 2 километров в городской среде будет основой для выбора высоты и расстояния базовой и мобильной станций. Предполагается, что мобильная станция движется с постоянной скоростью 40 км/ч, в то время как базовая станция остается неподвижной. Это исследование будет моделировать

каждый узел системы MIMO. Для параметров сигнала OFDM выбрано 1024 поднесущих.

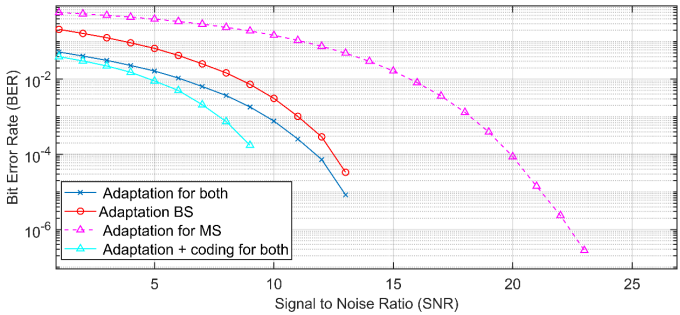


Рис. 1. BER для системы MIMO-OFDM на базовых и мобильных станциях с алгоритмами адаптации и кодами Рида-Соломона

Алгоритм адаптации снижает вероятность появления битовой ошибки в сообщении в системах MIMO на мобильных и базовых станциях. Таким образом, можно сделать вывод, что использование адаптивных алгоритмов повышает помехоустойчивость при обработке сигналов в приемном устройстве в условиях многопутного распространения сигнала.Используя метод адаптации для случая систем MIMO на мобильных и базовых станциях, можно повысить помехоустойчивость на дБ для SNR, как показано на рисунке 1. В случае изменения помеховой среды во время передачи данных по беспроводному каналу передатчик и приемник могут изменить кодирование канала. Сравнительный анализ отношений вероятности битовой ошибки при SNR 8 дБ без применения адаптации и кодирования к этой вероятности при различном сочетании алгоритмов адаптации и кодирования в мобильной и базовой станциях показывает, что при использовании адаптации в мобильной станции даже без кодирования эта вероятность снижается в 1,8 раза; адаптация одновременно на мобильной и базовой станциях снижает вероятность в 122 раза; применение адаптивного алгоритма одновременно в мобильной и базовой станциях с кодированием Рида-Соломона уменьшает вероятность битовой ошибки в передаваемом сообщении в 643 раза. Следовательно, использование адаптивных алгоритмов совместно с кодированием Рида-Соломона оказывает положительное влияние на помехоустойчивость при обработке сигналов в передающем и приемном устройствах в условиях многопутного распространения сигналов в городских условиях при плотной застройке даже при перемещении мобильной станции со скоростью 40 км/час.

Выводы

В этом исследовании рассматривается развитие методики разработки адаптивного блока обработки сигналов для амплитудно-фазовых систем. Описан метод разработки адаптивной системы обработки сигналов для системы 3D MIMO-OFDM на базовых и мобильных станциях. Данные передавались при

различных уровнях SNR как с использованием метода адаптации, так и без него. Также рассматриваются проблемы, связанные с повышением помехоустойчивости системы связи за счет использования алгоритмов адаптации в сочетании с кодированием с коррекцией ошибок. Использование кодирования с коррекцией ошибок повышает устойчивость информационного потока к ухудшению качества передаваемой информации из-за помех, шума и замирания сигнала. Код Рида-Соломона включает в себя эффективный механизм исправления ошибок. Код Рида-Соломона обеспечивает потенциальное увеличение до 5 дБ при использовании адаптивных алгоритмов на мобильных и базовых станциях для MIMO-OFDM. В результате проведенного моделирования установлено, что при совместном использовании кодирования Рида-Соломона и адаптивных алгоритмов в МС и БС станциях вероятность битовых ошибок уменьшается в передаваемом сообщении в 643 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федосов В.П., Аль-Мусави Висам, Кучерявенко С.В. Transmission Data in 3D Channel Using Adaptive Algorithm Based on The MIMO-OFDM in a Densely Built-Up Area // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2023. – С. 240–243.
2. Fedosov V., Jameel J., Kucheryavenko S. Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – № 012131.
3. Федосов В.П., Муравицкий Н.С. Адаптивная приемная антенная решетка для обработки пространственно-временных сигналов в MIMO-системе беспроводной передачи данных // Антенны. – 2011. – № 8(171). – С. 35–43.
4. Fedosov V., Legin A., Lomakina A. Adaptive algorithm for data transmission in wireless channels based on MIMO–OFDM technique // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2017. – С. 218–221.
5. Федосов В.П., Джамиль Д.С., Кучерявенко С.В. Analysis of an adaptive algorithm for processing space-time signals for image transmission based on 3D wireless channel model // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW). – 2021. – С. 443–446.
6. Федосов В.П., Аль-Мусави Висам М.М., Кучерявенко С.В. Пространственно-временной адаптивный алгоритм с использованием кода Хэмминга на основе модели беспроводного канала 3D-MIMO // Радиотехника. – 2024. – Т. 88.
7. Tugulan G.A. Indoor localization with 5G technology: a performance evaluation of uplink positioning methods and non-line of sight (NLOS) detection // 2023.

8. Shrivastava P., Singh U.P. Error detection and correction using Reed Solomon codes // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. – 2013. – T. 3.

9. Gesbert D., Shafi M., Shiu D.-s., Smith P.J., Naguib A. From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2003. – T. 21. – C. 281–302.

10. Hendrick R.E. Signal, noise, signal-to-noise, and contrast-to-noise ratios // Breast MRI: Fundamentals and Technical Aspects. – 2008. – C. 93–111.

11. Джамиль Д.С. Передача информации на основе канала MIMO-OFDM 3D WIMAX с использованием адаптивного алгоритма // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов. – 2021. – С. 107–112.

Автор: Федосов Валентин Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, переулок Некрасовский, 44, 347928, телефон: +7 (863) 437-16-32, email: vpfedosov@sfedu.ru.

Author: Fedosov Valentin Petrovich, Doctor of Technical Sciences (Ph.D), professor, The Department of Fundamentals of Radio Engineering (FRE), Institute of Radio Engineering Systems and Control, Southern Federal University, 44 Nekrasovsky lane, Taganrog 347928, Russia, phone+7 (863) 437-16-32, email: vpfedosov@sfedu.ru.

Автор: Аль-Мусави Висам Мохаммедтаки М Джавад, аспирант кафедры теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, переулок Некрасовский, 44, 347928, телефон: +7 (961) 302-86-09, email: wesamalmussawi@gmail.com.

Author: Almusawi Wisam Mohammedtaqi M. Jawad, postgraduate student The Department of Fundamentals of Radio Engineering (FRE), Institute of Radio Engineering Systems and Control, Southern Federal University**,** 44 Nekrasovsky lane, Taganrog 347928, Russia, phone: +7 (961) 302-86-09 email: wesamalmussawi@gmail.com.

УДК 004.032.2

Юрченко Анастасия Юрьевна, Поленов Максим Юрьевич

РАСПОЗНАВАНИЕ ШТРИХ-КОДОВ ПРОДУКЦИИ НА КОНВЕЙЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕЙ

В данной работе рассматривается система для распознавания штрих-кодов в реальном времени с использованием методов компьютерного зрения. Целью исследования является разработка решения для автоматизированного считывания штрих-кодов с движущихся объектов в условиях производственной среды. Система ориентирована на работу в ситуациях, где объекты могут отличаться по высоте, положению и скорости перемещения по транспортной ленте. Основной акцент сделан не на максимальной скорости обработки, а на обеспечении широкого угла обзора и надёжности распознавания при движении объектов. Проблема потери кадров решается за счёт асинхронной обработки и применения системы очередей. Архитектура системы включает сетевую камеру и сервер, выполняющий обработку изображений и хранение выходной информации.

Штрих-код, распознавание образов, компьютерное зрение, нейросеть, распределенная система.

Yurchenko Anastasiya Yuryevna, Polenov Maxim Yuryevich

PRODUCT BARCODE RECOGNITION ON A CONVEYOR BELT USING NEURAL NETWORKS

This work presents a distributed system for real-time barcode recognition using computer vision methods. The aim of the study is to develop a solution for automated barcode reading from moving objects in an industrial environment. The system is designed to operate in conditions where objects may vary in height, position, and speed as they move along a conveyor belt. The main focus is not on achieving maximum processing speed, but rather on providing a wide field of view and ensuring reliable recognition of moving objects. The issue of frame loss is addressed through asynchronous processing and the use of a queuing system. The system architecture includes a network camera and server that performs image processing and stores the output data.

Barcode, image recognition, computer vision, neural network, distributed system.

Введение

В промышленности штрих-коды являются самым распространенным способом маркировки изделий. Они используются для учета и хранения сведений о продукции.

На данный момент самым надежным средством считывания и распознавания штрих-кодов являются лазерные считыватели, однако они имеют очень узкий угол обзора и захватывают максимум несколько

сантиметров (до 15 см). Другим решением, являются камеры умного зрения для производств, но они тоже имеют угол обзора около 12 градусов.

Существуют различные инструменты распознавания штрих-кодов с помощью методов компьютерного зрения, подходящие как для простых, так и для сложных сценариев [1]. Однако большинство существующих решений ориентированы либо на обработку статичных изображений, либо на использование в мобильных приложениях, что ограничивает их применимость в задачах реального времени и обработки непрерывного видеопотока. Открытые и адаптируемые инструменты для эффективного детектирования и декодирования штрих-кодов в реальном времени на видеопотоке представлены крайне ограниченно.

Для решения поставленной задачи считывания и распознавания штрих-кодов продукции на конвейерной ленте была проведены исследования и анализ современных методов, используемых в компьютерном зрении, и разработана распределенная система, объединяющая нейросетевой детектор объектов YOLOv8 и алгоритмы декодирования штрих-кодов.

Описание проекта системы

Особенностью решения является асинхронная архитектура с использованием очередей, что обеспечивает параллельную обработку видеокадров, выполнение детекции нейросетевой моделью, декодирование штрих-кодов и сохранение результатов. Проект реализован на языке Python, наиболее подходящем для работы с нейросетями.

В целом обработка состоит из нескольких этапов. Первым этапом выхватывается кадр из видеопотока и ставится в очередь, для того чтобы при задержке обработки кадр не терялся. Далее из этой очереди нейросеть YOLO, обученная на поиск штрих-кодов, выхватывает кадры и ищет штрих-код, если находит – возвращает его координаты. Затем этот кадр, вместе с координатами ставится уже в другую очередь, обрезается с отступом и далее производится попытка распознать штрих-код, при неудаче кадр отдается другой нейросети – MPRNet, которая обучена восстанавливать размазанные изображения, затем снова отдается алгоритму распознавания. Возвращается в систему содержимое штрих-кода. В итоге алгоритм работает в 6 потоках и с использованием 5 очередей. На вход может получать сохраненные видео, изображения или видеопоток, кадры обрабатываются библиотеками OpenCV и Pillow.

Далее рассмотрим каждый этап отдельно. Для того, чтобы не тратить ресурсы на улучшение каждого кадра, в начале цикла фрейм (кадр) передается модели YOLO для нахождения штрих-кода на изображении. Нейросеть обучена на ≈400 размеченных изображений различного качества. При этом некоторую часть датасета составляли изображения, не содержащие объектов, что необходимо для повышения точности работы системы. Так как необходимо находить только один тип объектов и важна скорость работы, предложено использовать самую легковесную и быструю версию из восьмой серии – YOLOv8n [2], поскольку в данной работе средства выбирались исходя из условий малой производительности сервера, а благодаря оптимальному балансу

между точностью и скоростью, YOLOv8 подходит для задач обнаружения объектов в реальном времени в различных областях применения. При нахождении объекта нейросеть возвращает координаты левого верхнего и правого нижнего углов бокса, в котором расположен объект по мнению нейросети, а также уверенность (confidence score) – вероятность, что объект обнаружен верно (0.0–1.0) и класс объекта (их несколько, если нейросеть обучена на нескольких объектах).

Следующим этапом является обрезка на основе координат, возвращенных YOLO. От крайних точек делается отступ в 10 пикселей, чтобы случайно не обрезать сам штрих-код, так как рамки от нейросети иногда могут заходить на объект.

Затем происходит попытка декодирования информации. Распознавание штрих-кодов построено на базе двух библиотек на Python: PyZbar [3] и ZXing [4]. Для повышения скорости и точности распознавания процесс построен каскадно. При анализе работы обеих библиотек на 40 изображениях с визуально видимыми штрих-кодами, библиотека PyZbar не справилась с 7 изображениями, а ZXing-cpp с 13, но при этом скорость работы была выше на 30%.

С учётом приведённых факторов, а также эмпирических результатов, было принято решение вызывать ZXing-cpp в первую очередь, а в случае неудачного распознавания – прибегать к повторной попытке с использованием Pyzbar что позволило сократить время работы только PyZbar до 12.68 сек, а также количество нераспознанных изображений сократилось до 5. Далее к распознаванию добавлена обработка с помощью встроенных инструментов библиотеки OpenCv. Были изучены разные методы и алгоритмы обработки изображений [5-8], однако выбраны самые элементарные, так как для сложных алгоритмов необходимо учитывать много факторов (освещение, степень шума, размытости и т. д.). Первый способ – бинаризация. Этот процесс преобразует полноцветное или полутоновое изображение в черно-белое, где каждый пиксель имеет только одно из двух значений: 0 (черный) или 255 (белый). Второй метод – увеличение разрешения в 2 раза. Третий метод – увеличение резкости с последующей бинаризацией. По итогу проверки этого метода время работы увеличилось (16.55 сек), но и количество удачных декодирований увеличилось до 95% (38 из 40 изображений успешно обработаны).

Если распознавание оказалось неудачным, тогда применяется нейросеть MPRNet [9,10] с функцией деблюринга. На рисунке 1 можно увидеть результат восстановления смазанного изображения. Нейросеть написана на фреймворке PyTorch.

Далее, вышеописанная система декодирования штрих-кодов снова пытается распознать штрих-код с уже улучшенного изображения, и либо выводит результат, либо отбрасывает кадр.

Так как система разрабатывалась для реального предприятия, важно отметить, что при известных условиях работы систему можно настроить более гибко: сделать фильтрацию по типу штрих-кода, например Code-128 (и PyZbar,

и ZXing-cpp имеют такие настройки фильтрации) это отсекает поиск лишней информации и ускоряет процесс.



Рис. 1 Сравнение изображений до и после восстановления нейросетью MPRNet

Также, если известно, что все штрих-коды уникальны и являются серийными номерами каждого изделия, перед занесением в базу штрих-код можно проверять на соответствие формату и сохранять только уникальные коды.

Выводы

В ходе работы была разработана система для автоматизированного обнаружения и распознавания штрих-кодов из сохраненных видео или из видеопотока в реальном времени. В качестве основы для детектирования использована модель YOLOv8, продемонстрировавшая высокую скорость и точность локализации штрих-кодов на отдельных кадрах. Распознавание содержимого осуществлялось с использованием выбранных библиотек, в том числе с предварительной и постобработкой изображений, включающей масштабирование, повышение резкости и восстановление качества с помощью нейросетевой модели MPRNet.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chen, C. Robust Barcode Recognition in the Wild // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2021. – Vol. 44. – № 5. – P. 2587-2602.

2. Бурень, М. Н. Обзор возможностей YOLO v8 в рамках решения задачи распознавания изображений // Компьютерные системы и сети : сборник статей 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, БГУИР. – Минск : БГУИР, 2024. – С. 28-33.

3. ZBar Development Team. ZBar Barcode Reader: Open-source software for 1D/2D barcode scanning. – 2023. – URL: https://zbar.sourceforge.net/about.html (дата обращения: 10.04.2025).

4. Zxing // GitHub. URL: https://github.com/zxing/zxing (дата обращения: 27.04.2025).

5. Иващенко, В. Ю. Восстановление изображений и различные техники реставрации используемые в сфере обработки визуальных цифровых ресурсов

// Теория и практика современной науки. – 2019. – № 12 (54). – С.143-147. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vosstanovlenie-izobrazheniy-i-razlichnye-tehniki-restavratsii-ispolzuemye-v-sfere-obrabotki-vizualnyh-tsifrovyh-resursov (дата обращения: 27.04.2025).

6. Вербицкая, В. И. Реализация алгоритма восстановления «Фильтр Винера» на Python / В. И. Вербицкая, Д. В. Коршикова, Е. В. Купчина // Информационные технологии и управление : материалы 60-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов, БГУИР. – Минск : БГУИР, 2024. – С. 69.

7. Коршикова, Д. В. Алгоритмы восстановления изображений / Д. В. Коршикова, Д. П. Кукин, Е. В. Купчина // Информационные технологии и системы 2023 (ИТС 2023) : материалы Международной научной конференции, БГУИР. – Минск : БГУИР, 2023. – С. 149-150.

8. Гарсия, Г. Обработка изображений с помощью OpenCV / Г. Гарсия, О. Суарес, Х. Аранда; пер. с англ. Слинкин А.А. – Москва : ДМК Пресс, 2016. – 210 с.

9. Abuolaim, A. NTIRE 2021 Challenge for Defocus Deblurring Using Dual-pixel Images: Methods and Results / Abdullah Abuolaim, Radu Timofte, Michael S. Brown, Dafeng Zhang et al. // 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2021. – P. 578-587.

10. Nah, S. NTIRE 2021 Challenge on Image Deblurring / Seungjun Nah; Sanghyun Son; Suyoung Lee et al. // 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2021. – P. 149-165.

Авторы: Юрченко Анастасия Юрьевна, студентка Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7 (918) 560-97-41, e-mail: iurchen@sfedu.ru;
Поленов Максим Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного Федерального Университета, Россия, город Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7(8634)37-16-56, e-mail: mypolenov@sfedu.ru.

Authors: Yurchenko Anastasiya Yuryevna, student of the Institute of Computer Technology and Information Security of the Southern Federal University, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovsky lane, 347922, phone: +7(918)560-97-41, e-mail: iurchen@sfedu.ru;
Polenov Maxim Yuryevich, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Computer Engineering at the Institute of Computer Technology and Information Security of the Southern Federal University, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovsky lane, 347922, phone: +7(8634)37-16-56, e-mail: mypolenov@sfedu.ru.

УДК 681.883.054

Панычев Андрей Иванович, Максимов Александр Викторович

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА КОМПЕНСАЦИИ ТРАЕКТОРНЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ В ГИДРОЛОКАТОРЕ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Представлены результаты тестирования разработанного алгоритма микронавигации в гидролокаторе с синтезированной апертурой. Дана оценка эффективности компенсации нестабильностей траектории движения, вызванных сносом (раскачиванием), рысканием и нестабильностью курсовой скорости платформы гидролокатора с двенадцатиэлементной приемной антенной. Исследовано влияние зашумленности эхосигнала на точность работы алгоритма микронавигации.

Синтезированная апертура, снос, раскачивание, рыскание, компенсация траекторных нестабильностей, микронавигация, гидролокатор.

Andrey Ivanovich Panychev, Aleksandr Viktorovich Maksimov

MODELING OF TRAJECTORY INSTABILITY COMPENSATION MODE IN A SYNTHETIC APERTURE SONAR

The results of testing the developed micronavigation algorithm in a synthetic aperture sonar are presented. An assessment of compensation effectiveness for trajectory instabilities caused by demolition (sway), yaw, and heading speed instability of a synthetic aperture sonar platform with a twelve-element receiving antenna is given. The effect noise level of the echo-signal on the accuracy of the micronavigation algorithm is investigated.

Synthetic aperture, demolition, sway, yaw, trajectory instabilities compensation, micronavigation, sonar.

Введение

Используемая в гидролокаторах с синтезированной апертурой (ГСА) технология обеспечивает охват за короткое время больших площадей при дальностях в несколько сот метров с достаточно высоким разрешением, составляющим несколько сантиметров и позволяющим обнаруживать и классифицировать малоразмерные и малозаметные донные объекты [1, 2]. Эффективность ГСА существенно зависит от точности навигации и ориентации антенны относительно траектории движения носителя. Навигационные системы различного типа – инерциальные, глобальные спутниковые, гидроакустические – гарантируют точность позиционирования не менее нескольких длины волны зондирующего сигнала. При этом технология СА требует точность позиционирования платформы, обеспечивающую отклонение от расчетных параметров траектории не более одной длины волны [3, 4]. Последние достижения в улучшении качества и надёжности изображений, основанные на новых подходах в области обработки сигналов, машинного обучения и

навигации, предполагают точность удержания платформа не хуже четверти длины волны и даже меньше [5–7].

Таким образом, производительность ГСА существенно зависит от точности позиционирования антенны на этапе синтезирования апертуры, что определяет актуальность разработки и исследования алгоритмов компенсации траекторных нестабильностей носителя гидролокатора, которые часто называют алгоритмами микронавигации.

Постановка задачи, анализ и выбор метода решения

Целью исследования является разработка и анализ алгоритма микронавигации, компенсирующего основные пространственные ошибки позиционирования антенны многоканального ГСА. Расчетным движением носителя в режиме синтезирования апертуры является его равномерное прямолинейное перемещение параллельно поверхности дна. В реальных условиях водной среды под действием течений, ветра, волнения водной поверхности, нестабильной работы двигательной установки и других факторов положение платформы может существенно меняться. Для автономных подводных аппаратов, которые в настоящее время являются основным типом носителей ГСА, характерны следующие нарушения идеальной траектории движения (рис. 1):

- снос вдоль путевой линии δx, обусловленный, по большей части, нестабильностью курсовой скорости носителя;

- снос перпендикулярно путевой линии (раскачивание) δy, обусловленный, в основном, течением водных слоев;

- рыскание (поперечное смещение с поворотом в наклонной плоскости) с углом θ, обусловленное не только гидродинамическими эффектами, но и качеством системы управления движением.

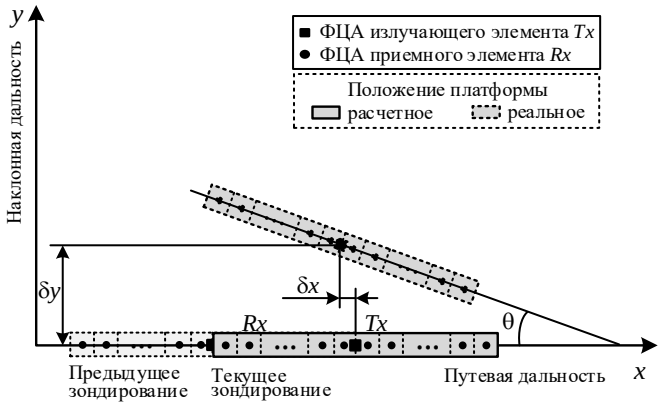


Рис. 1 Иллюстрация нарушения положения платформа на последовательных циклах зондирования в ГСА

Известные методы микронавигации адаптированы к многоканальным ГСА и являются методами корреляционного типа, позволяющими извлекать информацию о нестабильности траектории носителя из самих принятых эхосигналов. Для этого требуется выбор скорости перемещения платформы, обеспечивающей перекрытие некоторого количества фазовых центров приемных элементов антенной системы (ФЦА) на двух соседних по времени зондированиях. Это позволяет оценить пространственные флуктуации носителя путем вычисления положения пика взаимной корреляционной функции между двумя группами сигналов в приемных каналах, соответствующих перекрывающимся ФЦА приемных элементов на соседних зондированиях. В итоге восстанавливается приближенное значение поправки времени задержки в приходе сигналов каждого приемного элемента для расчетной (идеальной) и реальной траектории [8–13].

Наиболее разработанная технологии синтезирования апертуры основана на приближении избыточных фазовых центров антенны (redundant phase centers, RPC), суть которого заключается в том, что реальная бистатическая многоканальная система с разнесенными в пространстве излучателем и приемной линейной антенной системой заменяется фиктивной моностатической моделью излучения–приема, в которой каждая пара ФЦА излучателя и отдельного приемного элемента совмещены в одной (средней) точке для этой пары [8]. С приближением RPC хорошо согласована процедура компенсации траекторных нестабильностей методом антенны со смещенным фазовым центром (displaced phase-center antenna, DPCA). Вследствие перехода от бистатической гидролокации к моностатическому приближению существенно сокращаются вычислительные затраты синтезирования апертуры при приемлемом ухудшении разрешения по путевой дальности.

Для решения поставленной задачи применим метод DPCA.

Разработка алгоритма микронавигации

Как отмечалось в [14], процедура микронавигации относится к этапу межканальной обработки сигналов в ГСА. Считаем, что синтезирование апертуры производится на основе методов и алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС). Для этого на предшествующем микронавигации этапе внутриканальной обработки в каждом приемном канале выполняется дискретизация по времени и квантование по уровню непрерывных эхосигналов, цифровое формирование квадратурных составляющих, согласованная фильтрация комплексных огибающих и «грубая» компенсация траекторных нестабильностей коррекций фазы сигналов по данным бортовой навигационной системы.

«Точная» компенсация траекторных нестабильностей выполняется в темпе поступления эхосигналов циклически, начиная со второго и заканчивая последним зондированием. Положение антенны на первом зондировании принимается как эталонное. Структурная схема одной итерации алгоритма микронавигации приведена на рис. 2. На каждой итерации алгоритма рассматривается два набора, каждый из $N_э$ сигналов в приемных каналах,

соответствующие двум последовательным зондированиям. Эти сигналы проходят следующие этапы ЦОС.

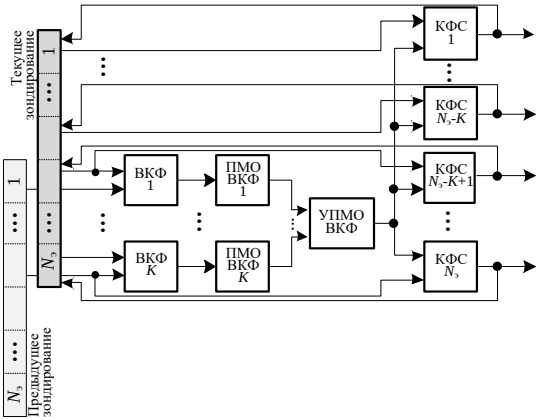


Рис. 2 Структурная схема алгоритма микронавигации в ГСА

1) Формирование K пар приемных каналов, соответствующих перекрывающимся ФЦА приемных элементов антенной системы на текущем и предыдущем зондированиях.

2) Вычисление взаимных корреляционных функций (ВКФ) сигналов в сформированных парах приемных каналов методом «быстрой» свертки в частотной области, для чего последовательно к сигналам применяется дискретное преобразование Фурье (ДПФ), производится умножение спектра сигнала из предыдущего зондирования на комплексно сопряженный спектр сигнала из текущего зондирования и затем к произведению применяется обратное ДПФ.

Положение максимального по модулю отсчета ВКФ на оси времени характеризует вызванную нестабильностью движения носителя разницу между задержками сигналов в соответствующей паре приемных каналов на двух последовательных зондированиях.

3) Вычисление уточненного положения максимального по модулю отсчета (ПМО) ВКФ каждой пары приемных каналов, которое характеризует вызванную флуктуациями движения разницу между задержками сигналов, принятых в одной и той же точке траектории на двух последовательных зондированиях.

Данный этап предназначен для уменьшения ошибки определения задержки между сигналами в одной паре приемных каналов, которая может достигать величины половины периода дискретизации. Для уточнение задержки в алгоритме используется метод центроида или многоточечная интерполяция отсчетов вблизи вершины главного лепестка ВКФ.

4) Вычисление усредненного положения максимального по модулю отсчета (УПМО) ВКФ как среднего арифметического определенных ранее уточненных значений положения максимального по модулю отсчета всех ВКФ.

Усредненное положение максимума всех ВКФ характеризует вызванную флуктуациями движения разницу между задержками сигналов во всех приемных каналах антенной системы на текущем зондировании относительно предыдущего зондирования.

5) Коррекция фазы отсчетов сигналов (КФС) текущего зондирования во всех приемных каналах внесением в фазового сдвига, соответствующего вычисленной усредненной разнице задержек, в частотной области.

6) Замена во всех приемных каналах эхосигналов, принятых на текущем зондировании, скорректированными сигналами и переход на обработку эхосигналов следующего зондирования.

Таким образом, по достижении последнего зондирования алгоритм микронавигации скорректирует фазы сигналов всех приемных каналов на всех зондированиях, кроме первого, положение платформы на котором принято как эталонное.

Обсуждение результатов

Анализ эффективности разработанного алгоритма микронавигации в ГСА выполнен для одной итерации алгоритма при следующих основных параметрах процесса синтезирования апертуры (см. рис. 1):

- количество элементов приемной антенной системы: $N_э = 12$;
- положение излучающего элемента *Tx*: в середине приемной антенны;
- количество перекрывающихся ФЦА приемных элементов *Rx* антенны на соседних зондированиях: $K = 6$;
- количество точечных отражателей: 1;
- наклонная дальность точечного отражателя на первом зондировании: не менее, чем на три порядка больше длины волны зондирующего сигнала λ;
- излучающий и приемные элементы антенной системы: ненаправленные;
- допустимое отклонение скорректированного положения ФЦА премного элемента от расчетного положения: не более одной λ в любом направлении.

На рис. 3 представлены результаты моделирования режима компенсации траекторных нестабильностей в ГСА на основе разработанного алгоритма микронавигации. Заданы величины поперечного сноса δy, нестабильности курсовой скорости δx и рыскания носителя θ (центр вращения платформы при рыскании совмещен с ФЦА излучателя *Tx*), соответствующие точности удержания платформы на идеальной траектории по данным таких навигационных средств, как инерциальные, глобальные спутниковые, гидроакустические навигационные системы.

На рис. 3,а–г показаны положения ФЦА излучающего *Tx* и приемных *Rx* элементов при большом значении отношения сигнал-шум (ОСШ) принимаемого эхосигнала. Как видно, алгоритм эффективно исправляет образ реального положения антенны и формирует виртуальное скорректированное положение

ФЦА, практически совпадающее с расчетным положением как при наличии только поперечного сноса δy, так и при совместном воздействии сноса δy и нестабильности курсовой скорости δx. Рыскание носителя θ алгоритмом не корректируется. При этом выработанные виртуальные координаты ФЦА отличаются от расчетных больше, чем реальные, поэтому ошибка синтезирования апертуры вследствие рыскания будет нарастать.

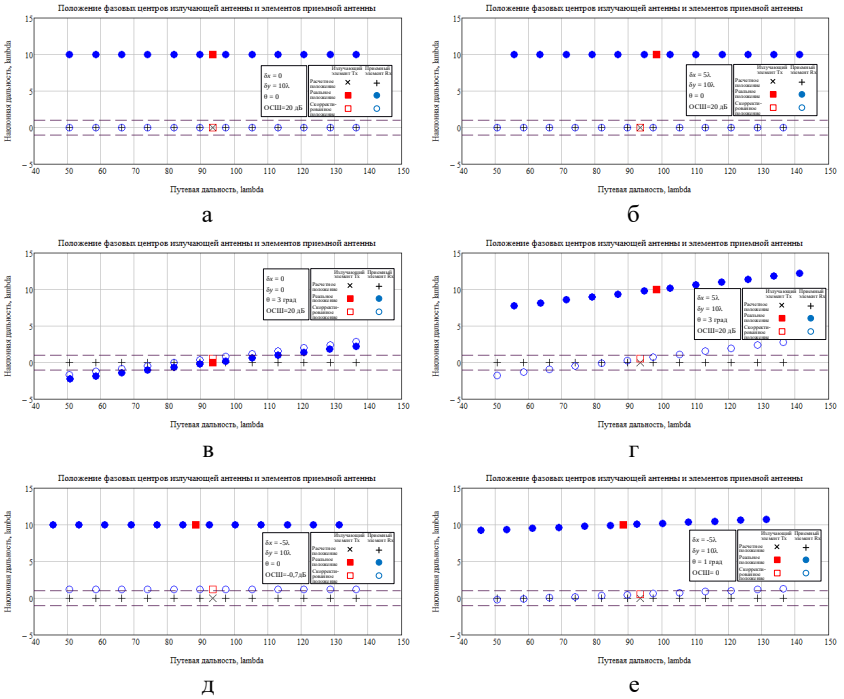


Рис. 3 Результаты моделирования режима компенсации траекторных нестабильностей в ГСА на основе разработанного алгоритма микронавигации

Приведенные на рис. 3,д результаты для случая воздействия поперечного сноса δy и нестабильности курсовой скорости δx позволяют судить о предельной величине ОСШ, при которой обеспечивается требуемая точность корректировки координат ФЦА элементов антенной системы и которая составляет минус 0,7 дБ.

Для исследуемой в моделировании конструкции антенной решетки установлено (рис. 3,е), что допустимое отклонение скорректированного положения ФЦА приемных элементов от расчетного положения на величину не более одной λ обеспечивается при сносе δy до 10λ, нестабильности курсовой скорости δx до 5λ, рыскании носителя θ до 1 градуса и ОСШ около нуля.

Выводы

Выполненный анализ разработанного алгоритма микронавигации в ГСА подтвердил его способность эффективно корректировать снос в поперечном траектории движения направлении и нестабильность курсовой скорости носителя от значений, обеспечиваемых навигационными системами различного типа, до величины меньше длины волны зондирующего сигнала.

Смещение ФЦА элементов антенной системы, вызванное рысканием носителя, алгоритм не компенсирует. В этой связи дальнейшее направление разработки алгоритма микронавигации предусматривает интегрирование в его состав «алгоритма корреляции лучей» [8], предназначенный для уменьшения ошибок навигации при больших угловых отклонениях антенной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hayes M., Gough P. Synthetic Aperture Sonar: A Review of Current Status // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2009. – No. 34. – P. 207–224. doi:10.1109/JOE.2009.2020853.

2. Hansen R., Callow H., Sæbø T., Synnes S. Challenges in Seafloor Imaging and Mapping With Synthetic Aperture Sonar // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2010. – No. 49. – P. 3677–3687. doi:10.1109/TGRS.2011.2155071.

3. Baik K., Park S., Kye J. Evaluation of underwater acoustic images obtained by the early stage monotone pulse-echo Synthetic Aperture Sonar // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2019. doi:10.1121/1.5102050.

4. Hansen R., Callow H., Sæbø T., Synnes S. Challenges in Seafloor Imaging and Mapping With Synthetic Aperture Sonar // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing .– 2010. – No. 49. – P. 3677–3687. doi:10.1109/TGRS.2011.2155071.

5. Choi H., Yang H., Seong W. Compressive Underwater Sonar Imaging with Synthetic Aperture Processing // Remote. Sens. – 2021 – No. 13, 1924. doi:10.3390/rs13101924.

6. Li J., Wang Z., You Z., Zhao Z., Yuan Z. (). U-SAS: U-Shape Network With Multilevel Enhancement and Global Decoding for Synthetic Aperture Sonar Image Semantic Segmentation // IEEE Sensors Journal. – 2025. – No. 25. – P. 1799–1813. doi:10.1109/jsen.2024.3491095.

7. Zhang X., Wu H., Sun H., Ying W. Multireceiver SAS Imagery Based on Monostatic Conversion // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing – 2021. – No. 14, P. 10835–10853. doi:10.1109/jstars.2021.3121405.

8. Hansen R. E. Introduction to Synthetic Aperture Sonar, Sonar Systems / Ed. Prof. N. Kolev // Tech. 2011. [Electronic resource]. URL: http://www.intechopen.com/books/sonarsystems/introduction-to-synthetic-aperturesonar (дата обращения: 11.05.2025 г.).

9. Hunter A. J., Dugelay S., Fox W. L. J. Repeat-Pass Synthetic Aperture Sonar Micronavigation Using Redundant Phase Center Arrays // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – Vol. 41. – No. 4. – P. 820–830. doi: 10.1109/JOE.2016.2524498.

10. Агеев А.Л., Игумнов Г.А., Костоусов В.Б., Агафонов И.Б., Золотарев В.В., Мадисон Е.А. Синтезирование апертуры многоканального гидролокатора бокового обзора с компенсацией траекторных нестабильностей // Подводные исследования и робототехника. – 2012. – № 2(14). – С. 13–27.

11. Bellettini A., Pinto M. A. Theoretical Accuracy of Synthetic Aperture Sonar Micronavigation Using a Displaced Phase-Center Antenna // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – Vol. 27. – No. 4. – P. 780–789.

12. Bellettini A., Pinto M. A. Experimental investigation of synthetic aperture sonar Micronavigation // Proceedings of the Fifth ECUA 2000, Lyon, France. – 2000. – P. 445–450.

13. Bellettini A., Pinto M. A. Accuracy of SAS micronavigation using a displaced phase centre antenna: theory and experimental validation // Saclantcen report. – 2002. – SR-355, 24 p.

14. Панычев А. И. Алгоритм формирования траекторного сигнала в гидролокаторе с синтезированием апертуры антенны // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2024»: материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием : в 2 т.; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2024. – Т. 1. – С. 171-178.

Авторы: Андрей Иванович Панычев, кандидат технических наук, главный инженер Научно-конструкторского бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета, Россия, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, 347922, телефон: +7 (8634) 39-30-75, email: aipanychev@sfedu.ru.
Александр Викторович Максимов, кандидат технических наук, доцент института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347922, телефон: +7 (8634) 37-16-34, email: avmaksimov@sfedu.ru.

Authors: Andrey Ivanovich Panychev, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Chief Engineer of the Scientific Design Bureau for Digital Signal Processing of the Southern Federal University, 2 Shevchenko Str., Taganrog, 347922, Russia; phone: +7 (8634) 39-30-75,email: aipanychev@sfedu.ru.
Aleksandr Viktorovich Maksimov, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), associate Professor of the Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, 44 Nekrasovsky per., Taganrog, Russia, 347922, phone: +7 (8634) 37-16-34, email: avmaksimov@sfedu.ru.

УДК 681.883.42

Маркович Игорь Ильич, Панычев Андрей Иванович,
Бугаев Сергей Александрович, Завтур Евгений Евгеньевич,
Козленя Сергей Николаевич, Насыров Владимир Гумерович

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОГО ФОРМИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ МНОГОЛУЧЕВОГО ЭХОЛОТА С ПРИЕМНОЙ ДУГОВОЙ АНТЕННОЙ

Выполнен анализ особенностей алгоритмов цифрового формирования характеристик направленности во временной и частотной областях в многолучевом эхолоте с дуговой приемной антенной. Установлено, что формирование веера лучей методом фазовых сдвигов в спектре сигнала в пространственном канале ЦОС более эффективен по вычислительной и аппаратной ресурсоемкости.

Многолучевой эхолот, дуговая антенна, формирование лучей, цифровая обработка сигналов.

Markovich Igor Ilyich, Andrey Ivanovich Panychev,
Sergey Alexandrovich Bugaev, Evgeny Evgenevich Zavtur,
Sergey Nikolaevich Kozlenya, Vladimir Gumerovich Nasyrov

COMPARATIVE ANALYSIS OF DIGITAL BEAMFORMING ALGORITHMS OF A MULTIBEAM ECHOSOUNDER WITH A RECEIVING ARC ANTENNA

An analysis of digital beamforming algorithms features in time and frequency domains for a multibeam echosounder with an arc receiving antenna is performed. It is found that a fan-shaped beam forming by phase shifts in the signal spectrum in the spatial channel of DSP is more efficient in terms of computational and hardware resource consumption.

Multibeam echosounder, arc antenna, beamforming, digital signal processing.

Введение

Многолучевые эхолоты (МЛЭ) широко применяются для картографирования и исследования геологического строения морского дна, поиска затонувших объектов, навигационной безопасности, экологических исследований, инженерных изысканий и строительства трубопроводов и кабельных линий связи, военных и разведывательных операций и решения других задач с высоким пространственным разрешением.

Теоретические основы функционирования МЛЭ и вопросы совершенствования методов обработки информации в МЛЭ с линейной и дуговой приемной антенной подробно изложены во многих научных работах, например, [1–6]. Выбор типа антенны зависит от целей гидроакустического исследования. Преимуществом МЛЭ с дуговой антенной является равноугольное положение лучей одинаковой ширины в веерной характеристике

направленности (ХН). Некоторые аспекты проектирования и эксплуатации МЛЭ с дуговыми антеннами рассмотрены в [7–10].

Анализ методов формирования ХН в МЛЭ

В МЛЭ производится фокусировка луча ХН в выбранном направлении, заключающаяся в согласованной обработке сигналов от некоторого набора элементов приемной антенны, расположенных определенным образом относительно друг друга. Для этого эхосигналы в разных приемных элементах задерживаются (или опережаются) во времени на рассчитанные в соответствии с конструкцией антенны значения таким образом, чтобы они складывались синфазно именно в нужном направлении (в направлении угла компенсации времени распространения эхосигналов), формируя узкий луч.

Для узкополосных зондирующих сигналов формирование ХН обычно производится с использованием комплексных огибающих (КО) эхосигналов.

В основе функционирования современных МЛЭ лежат методы цифровой обработки сигналов (ЦОС). Ключевым этапом обработки информации в МЛЭ является формирование веерной ХН, для чего применяется два подхода [1]:

- формирования ХН во временной области, когда используется метод «задержек и суммирования»;
- формирования ХН в частотной области, когда используется метод «фазового сдвига», заключающийся в том, что временные сдвиги сигналов входных каналов заменяются эквивалентными изменениями их фазовых спектров в частотной области.

Разработка и сравнительный анализ алгоритмов ЦФХН

Структурная схема исследуемого варианта алгоритма ЦОС, реализующего метод «задержек и суммирования» во временной области, представлена на рис. 1. Приемная дуговая антенна состоит из N_e элементов. Параллельная и независимая обработка эхосигналов $x_i(t)$ в каждом i-м канале ($i = 0, \ldots, N_e–1$) содержит дискретизацию по времени и квантование по уровню с помощью АЦП. Частота дискретизация эхосигналов $x_i(t)$ выбрана равной $F_{дв} = 4f_0$, что обеспечивает погрешность вносимых задержек, не превышающую четверти периода центральной частоты зондирующего сигнала f_0 (в этом случае фазовая ошибка не превышает $\pi/2$). Оцифрованные эхосигналы $x_i(nT)$, $i = 0, \ldots, N_e–1$, $n = 0, \ldots, N_s–1$ (N_s – длина реализации действительных сигналов в приемных каналах) записываются в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) и затем используются для формирования N_b идентичных пространственных каналов, формирующих лучи веерной ХН.

Каждый пространственный канал включает следующие этапы ЦОС:

- цифровое формирование характеристики направленности во временной области (ЦФХНв);
- цифровое формирование квадратурных составляющих (ЦФКС) эхосигналов во временной области с использованием стробоскопического эффекта при умножении на комплексную экспоненту и двух цифровых фильтров нижних частот, работающих с децимацией выходных отсчетов;

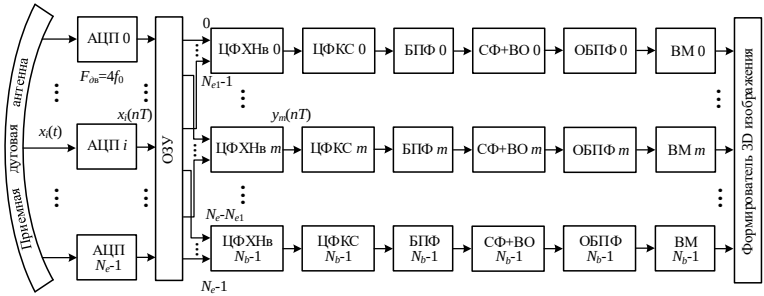


Рис. 1 Структурная схема алгоритма ЦОС в МЛЭ с дуговой антенной с формированием ХН во временной области

- дискретное преобразование Фурье КО эхосигналов, выполняемое по алгоритму быстрого преобразования Фурье (БПФ);

- согласованную фильтрацию (СФ) КО эхосигналов в частотной области, реализуемую методом «быстрой» свертки, и весовую обработку (ВО);

- обратное БПФ отклика СФ (ОБПФ);

- вычисление модуля последовательности временных отсчетов сжатого сигнала (ВМ);

- передача сигнала в формирователь цифровой 3D модели морского дна.

Алгоритм формирования луча во временной области ЦФХНв вырабатывает в m-м пространственном канале последовательность временных отсчетов сигнала

$$y_m(nT) = \sum_{l=0}^{N_{e1}-1} x_l(nT - n_{\text{зад}\,l}T),\ n = 0, \ldots, N_s-1,\ m = 0, \ldots, N_b-1, \qquad (1)$$

где $x_l(nT)$ – последовательность временных отсчетов действительного сигнала в l-м приемном канале;

$T = 1/F_\partial$ – период дискретизации сигналов в приемных каналах;

$n_{\text{зад}\,l}T$ – задержка между сигналами l-го приемного канала в группе, формирующей один луч, и канала, по которому выравнивается время прихода других сигналов в группе, округленная до целого числа периодов дискретизации;

$n_{\text{зад}\,l} = round(F_\partial \Delta_l / c_{\text{зв}})$ – номер отсчета сигнала расположенного наиболее близко к расчетному значению задержки в l-м приемном канале;

Δ_l – разность хода между сигналами l-го приемного канала в группе, формирующей один луч, и канала, по которому выравнивается время прихода других сигналов в группе;

$c_{\text{зв}}$ – скорость звука в воде;

N_s – длина реализации действительных сигналов в приемных каналах;

N_{e1} – количество приемных каналов, участвующих в формировании одного пространственного канала;

N_b – количество формируемых лучей ХН.

Структурная схема исследуемого варианта алгоритма ЦОС, реализующего метод «фазового сдвига» в частотной области, представлена на рис. 2.

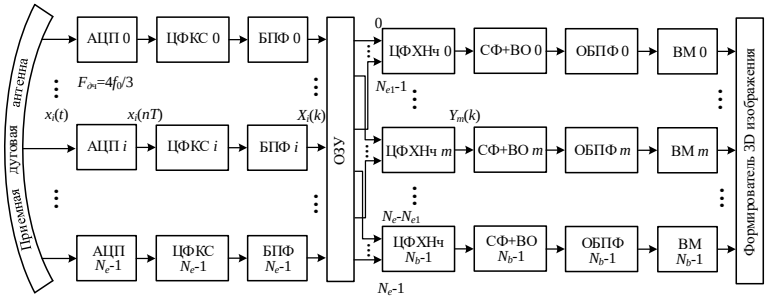


Рис. 2 Структурная схема алгоритма ЦОС в МЛЭ с дуговой антенной с формированием ХН в частотной области

В приемных каналах выполняется следующая обработка эхосигналов:

- оцифровка в АЦП с частотой дискретизации $F_{дч} = 4f_0/3$;
- ЦФКС по такому же алгоритму, как и в первом случае;
- БПФ КО эхосигналов для перехода в частотную область;
- запись в ОЗУ спектральных отсчетов КО $X_i(k)$, $i = 0, \ldots, N_e–1$, $k = 0, \ldots, N_s–1$.

Используя хранящиеся в ОЗУ данные, формируется N_b пространственных каналов, в каждом из которых сигнал обрабатывается следующим образом:

- цифровое формирование характеристики направленности в частотной области (ЦФХНч);
- СФ и ВО по таким же алгоритмам, что и в первом случае;
- обратное БПФ отклика СФ для перехода во временную область;
- вычисление модуля сжатого сигнала;
- передача сигнала в формирователь цифровой 3D модели морского дна.

Алгоритм формирования луча в частотной области ЦФХНч вырабатывает в каждом m-м пространственном канале последовательность спектральных отсчетов сигнала

$$Y_m(k) = \sum_{l=0}^{N_{e1}-1} X_l(k) e^{-j\varphi(l,k)}, \; k = 0, \ldots, N_s–1, \; m = 0, \ldots, N_b\text{-}1, \qquad (2)$$

где $X_l(k)$ – последовательность спектральных отсчетов КО сигнала в l-м приемном канале;

$\varphi(l,k) = 2\pi(f_0+f_k)t_{зад\,l}$ – фазовая функция сигнала в l-ом приемном канале дуговой антенны для k-го спектрального отсчета;

f_0 – центральная частота зондирующего сигнала;

$f_k = kF_д/N_s$ – значения частот спектра сигнала в приемном канале;

$t_{\text{зад }l} = \Delta_l / c_{\text{зв}}$ – расчетное значение задержки между сигналами l-го приемного канала в группе, формирующей один луч, и канала, по которому выравнивается время прихода других сигналов в группе.

Обсуждение результатов

Анализ алгоритмов ЦФХН во временной и частотной областях выполнен без децимации отсчетов эхосигналов и весовой обработки в частотной области.

Характеристики направленности одного луча в МЛЭ с дуговой антенной в диапазоне от минус 60 до плюс 60 градусов от угла компенсации луча, сформированные с применением алгоритмов ЦФХН во временной и частотной областях, приведены на рис. 3. Выполнена нормировка на максимальный отсчет в «идеальной» ХН, которая сформирована следующим образом: в алгоритмах по методу «задержек и суммирования» (1) и методу «фазового сдвига» (2) суммирование выполнялось в предположении, что необходимые задержки сигналов и соответствующие им фазовые сдвиги учтены идеально точно. Для этого суммы N_{e1} скорректированных последовательностей в (1) и (2) заменены умножением на величину N_{e1} последовательности в том канале, по которому выполняется выравнивание времени или фаз прихода всех других сигналов. Этот прием позволяет оценить погрешности обоих методов ЦФХН, но не учитывает погрешности, вносимые дискретизацией и другими этапами обработки эхосигналов.

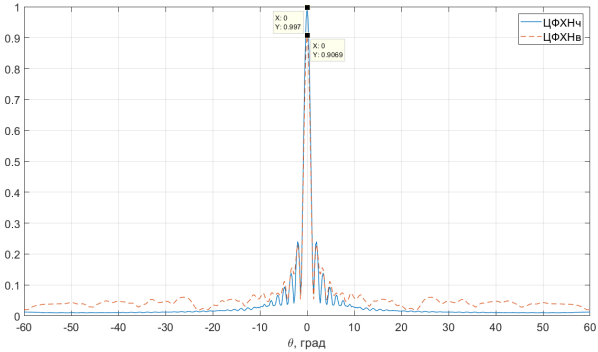
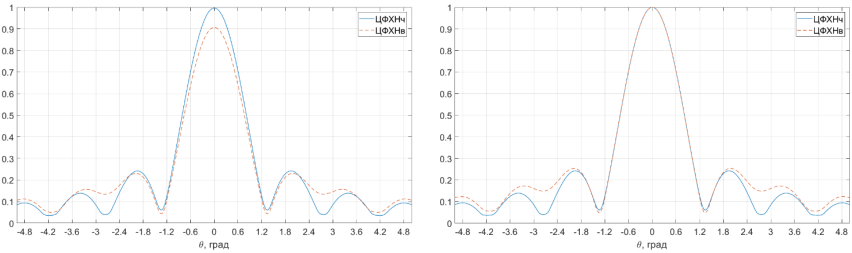


Рис. 3 ХН одного луча в МЛЭ с дуговой антенной, сформированные по алгоритмам ЦФХНв и ЦФХНч

Видно, при выполнении алгоритма ЦФХН во временной области (1) уменьшение величины отклика СФ относительно «идеального» случая составляют около 9,3 %, что вызвано большой погрешностью используемых временных задержек относительно расчетных значений, достигающей величины четверти периода дискретизации T. При использовании алгоритма ЦФХН в частотной области (2) уменьшение величины отклика СФ существенно меньше, составляют около 0,3 % и определяется погрешностями вычислительных процедур. При углах отклонения от максимума ХН более 30

градусов алгоритм ЦФХНч обеспечивает уровень не более минус 40 дБ, в то время как для алгоритма ЦФХНв уровень ХН во всем диапазоне углов не более минус 26 дБ.

Подробно вид главного и первых боковых лепестков ХН луча иллюстрирует рис. 4.



а б

Рис. 4 ХН одного луча в МЛЭ с дуговой антенной, сформированные по алгоритмам ЦФХНв и ЦФХНч: а – нормировка по «идеальной» ХН; б – нормировка традиционная

На рис. 4,а ХН, полученные двумя алгоритмами ЦФХН, нормированы на максимальный отсчет в «идеальной» ХН, как и на рис. 3. Видно, что форма главного лепестка в обоих случаях практически совпадает, уровни первых боковых лепестков отличаются мало, а уровни второго и следующих лепестков в алгоритме ЦФХНч несколько меньше. Более точная оценка основных параметров ХН, сформированных во временной и частотной областях, получена, когда они нормированы традиционным образом (рис. 4,б). Основные лепестки обеих ХН совпадают с вычислительной точностью, их ширина по уровню минус 3 дБ и по основанию одинакова. Уровень первого бокового лепестка в алгоритме ЦФХНч составляет 0,243 (–12,3 дБ), в алгоритме ЦФХНв этот параметр равен 0,254 (–11,9 дБ). Таким образом, параметры главного и первого бокового лепестков в обоих случаях практически совпадают.

Анализ вычислительных затрат, требуемых для реализации рассматриваемых алгоритмов (см. рис. 1, 2), показывает, что в алгоритме ЦФХНч больше на величину N_e–N_b количество процедур ЦФКС и БПФ. Как правило, число элементов приемной антенны N_e незначительно больше числа лучей в веере N_b, поэтому алгоритм ЦФХНв будет более быстродействующим в этой части ЦОС. Однако формирование ХН во временной области производится на частоте дискретизации, которая втрое выше частоты дискретизации при ЦФХН в частотной области ($F_{дв} / F_{дч} = 3$), а с учетом децимации сигналов это отличие может кратно увеличиться, что в итоге нивелирует данное преимущество алгоритма ЦФХНв.

Выводы

Сравнительный анализ алгоритмов ЦФХН во временной и частотной областях в МЛЭ с дуговой антенной показал, что параметры главного и первого

бокового лепестка ХН луча в обоих случаях совпадают с незначительными для практического применения отличиями. Уровень ХН во всем диапазоне обзора МЛЭ при ЦФХН во временной области составляет не более минус 26 дБ, при формировании в частотной области – при отклонении от максимума ХН на 30 градусов и более уровень ХН не превышает минус 40 дБ.

Вычислительные затраты и требования к производительности МЛЭ с ЦФХН во временной области выше, при этом уровни сигналов в сформированных лучах ниже примерно на 10 %.

Таким образом, для рассмотренных вариантов реализации МЛЭ алгоритм формирования ХН в частотной области по интегральному показателю требований к составу и производительности вычислительных средств МЛЭ является предпочтительным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Knight W. C., Pridham R. G., Kay S. (1981). Digital signal processing for sonar // Proc. of IEEE. – 1981. – Vol. 69, No. 11. – P. 1451–1506. doi:10.1109/PROC.1981.12186.

2. Маркович И. И. Методы и алгоритмы цифровой пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов в многолучевых эхолотах и локаторах препятствий // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 58–71.

3. Маркович И. И. Цифровая пространственно-временная обработка сигналов в многолучевом гидролокаторе морского подводного робототехнического комплекса // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1(203). – С. 239-248. doi: 10.23683/2311-3103-2019-1-239-248.

4. Liang C. S. et al. Development of a High-Resolution Multibeam Echosounder System for Deep-Ocean Surveys // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2019. – Vol. 44, No. 2. – P. 415–426.

5. Zhang D. A. et al. Performance Evaluation of a Compact Multibeam Bathymetry Sensor for Coastal Zone Monitoring // International Journal of Remote Sensing. – 2019. – Vol. 40, No. 16. – P. 6023–6042.

6. Lee H. J. et al. Improved Algorithms for Beamforming in Modern Multibeam Systems // Marine Geodesy. – 2019. – Vol. 42, No. 3. – P. 325–342.

7. Душенин Ю. В., Маркович И. И. Применение многолучевых гидроакустических средств с цифровой пространственно-временной обработкой сигналов для экологического мониторинга водных районов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 12(173). – С. 85–98.

8. Патент № 2699938 C1 Российская Федерация, МПК G01S 15/00. Впередсмотрящий гидролокатор глубоководного носителя : № 2019101013: заявл. 10.01.2019: опубл. 11.09.2019 / И. И. Маркович, В. В. Колган; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство обороны Российской Федерации.

9. Патент № 2802295 C1 Российская Федерация, МПК G01S 15/00. Впередсмотрящий гидролокатор с повышенным разрешением по дальности : № 2023107356: заявл. 27.03.2023: опубл. 24.08.2023 / И. И. Маркович, Е. Е. Завтур, А. А. Марьев; заявитель Федеральное государственное автономное

образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет».

10. Маркович И. И. Многолучевой гидролокатор с повышенной точностью измерения дальности, определением скорости и направления движения объектов // Экология 2023 – море и человек: Сборник трудов XII Всероссийской научной конференции и молодёжной школы-семинара, Таганрог, 21–23 сентября 2023 года. – Таганрог: Южный федеральный университет, 2023. – С. 67–77.

Авторы: Маркович Игорь Ильич, кандидат технических наук, директор - главный конструктор Научно-конструкторского бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета, Россия, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, 347922, телефон: +7(8634) 39-30-75, email: marco@sfedu.ru.

Панычев Андрей Иванович, кандидат технических наук, главный инженер НКБ ЦОС ЮФУ, Россия, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, 347922, телефон: +7(8634) 39-30-75, email: aipanychev@sfedu.ru.

Бугаев Сергей Александрович, заместитель директора НКБ ЦОС ЮФУ, Россия, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, 347922, телефон: +7(8634) 39-30-75, email: sabugaev@sfedu.ru.

Завтур Евгений Евгеньевич, начальник сектора НКБ ЦОС ЮФУ, Россия, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, 347922, телефон: +7 (8634)39-30-75; email: zavtur@sfedu.ru.

Козленя Сергей Николаевич, ведущий программист НКБ ЦОС ЮФУ, Россия, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, 347922, телефон: +7 (8634)39-30-75,
email: sergekc@sfedu.ru.

Насыров Владимир Гумерович, главный специалист, Россия, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, 347922, телефон: +7 (8634)39-30-75, email: vnasyrov@sfedu.ru.

Authors: Markovich Igor Ilyich, Candidate of Technical Sciences, Director - Chief Designer of the Scientific Design Bureau for Digital Signal Processing of the Southern Federal University, 2 Shevchenko Str., Taganrog, 347922, Russia; phone: +7(8634) 39-30-75, email: marco@sfedu.ru.

Panychev Andrey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Chief Engineer of the SDB DSP SFedU, 2 Shevchenko Str., Taganrog, 347922, Russia; phone: +7(8634) 39-30-75,email: aipanychev@sfedu.ru.

Bugaev Sergey Alexandrovich, Deputy Director of the SDB DSP SFedU, 2 Shevchenko Str., Taganrog, 347922, Russia; phone: +7(8634) 39-30-75, email: sabugaev@sfedu.ru.

Zavtur Evgeny Evgenevich, Head of sector of the SDB DSP SFedU, 2 Shevchenko Str., Taganrog, 347922, Russia; phone: +7 (8634)39-30-75, e-mail: zavtur@sfedu.ru.

Kozlenya Sergey Nikolaevich, Lead programmer of the SDB DSP SFedU, 2 Shevchenko Str., Taganrog, 347922, Russia; phone: +7(8634) 39-30-75, email: sergekc@sfedu.ru.

Nasyrov Vladimir Gumerovich, Main expert of the SDB DSP SFedU, 2 Shevchenko Str., Taganrog, 347922, Russia; phone: +7(8634) 39-30-75, email: vnasyrov@sfedu.ru.

УДК 004.42+004.3
УДК 57.08+615.47+615.8

Проскуряков Александр Викторович

РЕАЛИЗАЦИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ НА БАЗЕ СИСТЕМНО - ИНФОРМАЦИОННОГО ПОДХОДА

В данной статье описан подход к проектированию и реализации автоматизированной информационной системы для диагностики заболеваний путём решения задачи поддержки принятия решений в процессе верификации медицинских биологических объектов с использованием методов системно-информационного подхода, с использованием математических моделей реализации некоторых алгоритмов эталонного, безэталонного информационно-энтропийного способов обработки медицинских рентгенографических, томографических снимков. Рассмотрены основные принципы их реализации, ключевые характеристики, на которых строится анализ изображений и результаты диагностики фрагментов медицинских биологических объектов. Это позволяет повысить оперативность, точность верификации состояния медицинских биологических объектов, своевременность, достоверность процесса диагностики заболеваний. Показана научная новизна, результаты апробации материала, представленного в статье на международных, всероссийских конференциях, научных журналах.

Автоматизация, автоматизированная, биологический, верификация, безэталонный метод верификации, диагностика, информация, медицинский, метод, метод эталонный, подсистема, процесс, система, статистика, рентгенография, решение, томография, энтропия, эталон.

Proskuryakov Alexander Viktorovich

IMPLEMENTATION OF AN AUTOMATED INFORMATION SYSTEM FOR AUTOMATING THE DIAGNOSIS OF DISEASES BASED ON A SYSTEM-INFORMATION APPROACHTHE

This article describes an approach to the design and implementation of an automated information system for the diagnosis of diseases by solving the problem of decision support in the verification of medical biological objects using the methods of the system-information approach, using mathematical models for the implementation of some algorithms of reference, ethalon-free information-entropy methods for processing medical X-ray, tomographic images. The basic principles of their implementation, the key characteristics on which image analysis and diagnostic results of fragments of medical biological objects are based are considered. This makes it possible to increase the efficiency, accuracy of verification of the state of medical biological objects, timeliness, and reliability of the disease diagnosis process. The scientific novelty and the results of the approbation of the material

presented in the article at international and All-Russian conferences and scientific journals are shown.

Automation, automated, biological, verification, authentication-free verification method, diagnostics, information, medical, method, reference method, subsystem, process, system, statistics, radiography, solution, tomography, entropy, standard.

Введение. В данной статье рассматривается реализации автоматизированной информационной системы (АИС) на базе системно-информационного подхода для решения задач автоматизации диагностики заболеваний.

Решению задач повышения эффективности диагностики заболеваний путём своевременного выявления различных заболеваний и проведения **дифференциальной диагностики** мешают следующие проблемы.

1.Статья расходов госбюджета на медицину в 2017 году была сокращена с 0,7% в 2016 году до 0,4% ВВП и эта тенденция продолжала сохраняться и в 2022 году, когда бюджет предусматривал полагает сокращение расходов на здравоохранение – с 1,362 трлн рублей в 2021 году до 1,245 трлн рублей в 2022, или на 117 млрд рублей**.** Отмечается, что доля в общем объеме расходов федерального бюджета на здравоохранение в 2023 году по сравнению с 2022 годом уменьшилась с 5,6% до 5,1%, в 2024 и 2025 годах составила 5,2% и 5,4% соответственно.

2.В результате огромное количество медучреждений в средних, малых городах и сельской местности могут остаться неохваченными передовыми технологиями в области диагностики и лечения заболеваний.

3.Значительное превышение импорта по отношению к экспорту медицинского оборудования и медицинских изделий, то есть большая импортозависимость в данной области, что отражает диаграмма, показанная на рисунке 1.

Выходом в создавшейся ситуации является, разработка средств и методов диагностики и лечения на базе передовых технологий с повсеместным внедрением МИС, позволяющих своевременно, оперативно осуществлять диагностику, лечение, сопровождение пациентов в клиниках и стационарах.

Постановка задачи. Данная работа ориентирована на рассмотрении подхода проектирования и реализации АИС, МИС на базе системно-информационного подхода для решения задач автоматизации диагностики заболеваний в процессе верификации медицинских биологических объектов и их фрагментов по рентгенографическим и компьютерно-томографическим снимкам[1,2,3,4].

Можно выделить следующие этапы информатизации медицины.

1.Информатизация начиналась с поддержки отдельных врачебных решений.

2.Далее произошло изменение направления на автоматизацию управленческих процессов.

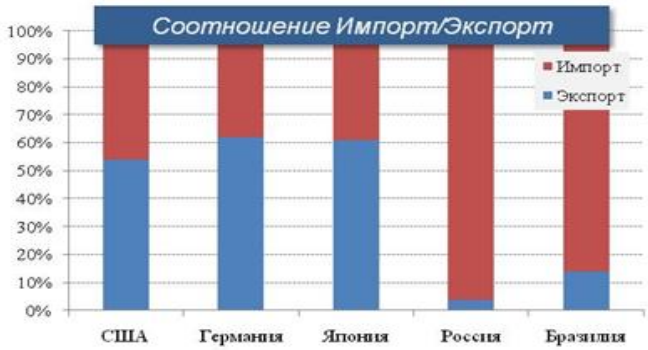


Рис. 1 Соотношение экспорта и импорта медицинского оборудования и медицинских изделий

3.Произошёл возврат к дифференцированным информационным системам по отдельным клиническим направлениям и по проблемам, которые обеспечивали поддержку и реализацию различных бизнес-процессов.

4.В дальнейшем МИС, обеспечивающие традиционную информатизацию и компьютеризацию процессов медицинской организации, начали трансформироваться в гибридные МИС, включающие модули поддержки принятия решений, реализованные различными способами.

В процессе постановки задачи необходимо было реализовать.

1.Синтезировать АИС верификации фрагментов медицинских биологических объектов с целью решения задач диагностики заболеваний, с использованием:

1.1 математических моделей описания состояния диагностируемых объектов;

1.2 информационных моделей описания состояния диагностируемых объектов;

1.3 алгоритмов и программного обеспечения инвариантных к видам заболеваний;

1.4 системно-информационного подхода с использованием методов концептуального и системного проектирования и реализации АИС.

2.Разработать математическое, информационное, программное, организационное обеспечение поддержки принятия решения АИС, в качестве которой выступает МИС для обработки диагностических и лечебных данных в медицинском учреждении[3,5,8].

3.Реализовать математическую, программную и информационную поддержку этапов диагностики и лечения пациентов из технологического цикла информационной поддержки характерного для функционирования МИС на основании верификации состояния фрагментов медико-биологических объектов, как метода диагностики состояния по их рентгенографическим и компьютерно-томографическим изображениям.

В процессе синтеза на уровне реализации АИС необходимо руководствоваться системно-информационным подходом, в основе которого лежит принцип системности при проектировании и реализации АИС и фундаментальное понятие информация с учётом его особенностей и свойств.

Реализация. Подсистема математического обеспечения. Математическая модель. Описание методов, используемых для диагностики

В работе рассматривается следующие этапы реализации АИС в рамках проекта разработки математического, информационного и программного обеспечения методологии верификации состояния фрагментов биологических объектов, как метода диагностики состояния параназальных пазух по их рентгенографическим и компьютерно-томографическим изображениям:

1. разработка информационной цифровой модели представления исследуемого фрагмента (лобной и верхнечелюстной пазух) по его статическим отображениям (рентгенограмма, томограмма, диафанограмма);
2. разработка и адаптация к признакам патологий объектов отоларингологической среды математического, программного, информационного обеспечение для синтеза и анализа их адекватных моделей на основе статистической базы данных, сконструированной по имеющимся историям болезней пациентов городской клиники;
3. разработка методологии построения статистических портретов (образов) цифровых и пленочных изображений отоларингологических фрагментов с различными признаками заболеваний в соответствии с их возрастной классификацией как основы АИС в виде экспертной системы при вынесении советующего решения при диагностике.

Данная работа ориентирована на рассмотрении процесса верификации медицинских биологических объектов и их фрагментов по рентгенографическим и компьютерно-томографическим снимкам МИС автоматизации диагностики заболеваний с использованием следующих методов верификации для диагностики заболеваний [2,4,5,6].

1.Метод сравнения с эталоном, основанный на математической статистике (способ).

2.Метод, основанный на вычислении расстояния между изображениями эталона и исследуемой области (способ)[9,10].

3.Метод, основанный на вычислении оценки информативности эталона и исследуемой области (способ)[9,10].

4.Безэталонный метод (способ)[2,3,6,7,8,9].

5.Информационно - энтропийный метод (способ).

Данный метод основан на вычислении новой (непредсказуемой) и избыточной (предсказуемой) информации Клода Шеннона. При таком анализе мы рассчитываем показатель энтропии целевой области, рассчитываем максимальный показатель энтропии (исходя из количества уровней изображения), и, сравнивая полученные два значения, делаем вывод анализа (по принципу – чем больше энтропия, тем хуже). Данный подход также

позволяет получить релевантный результат при условии хорошей ограниченности исследуемого объекта (исследуемый объект должен включать всю исследуемую область, и не включать ничего кроме этого)[8,9].

При векторном описании изображения среднее количество информации изображении равно энтропии источника:

$$H(f) = -\sum_{t=1}^{t} P(f_t)\log\ \mathrm{P}(f_t) \qquad (1)$$

Данный подход предполагает реализацию следующего алгоритма:

1.исследуемое изображение рентгеновского снимка разбивается на отдельные участки – сегменты;

2.размеры участка могут варьироваться в зависимости от наличия априорной информации об искомом признаке патологии (размер исследуемого фрагмента лобной, носоподбородочной области, области грудной клетки и т.д.);

3.оцифровка фрагмента – участка заключается в его декомпозиции-анализе в виде размеров точки, с ранее заданной масштабной сеткой налагаемой на исследуемый снимок;

4.масштаб сетки формируется в процессе диагностики, то есть выполняется адаптация;

5. каждый фрагмент представляется в виде матрицы значений размером n x n денситометрического параметра: плотности яркости или черноты;

6.каждая матрица в соответствии со стандартным алгоритмом обработки отображается в виде гистограммы распределений частности денситометрии параметра с последующим определением основных числовых характеристик: среднее арифметическое, выборочная (исправленная дисперсия), СКО, коэффициент вариации для оценки гистограммы. В результате каждая гистограмма является основой для оценки соответствующего сегмента снимка среднестатистической и максимальной энтропией в стандартных единицах измерения битах.

Так как в основе реализации АИС лежит системно-информационный подход, то при реализации подсистемы информационного обеспечения необходимо руководствоваться следующими свойствами информации, как ресурса.

При реализации задачи, решаемой в данной работе будем акцентировать внимание и выбор на следующих свойствах информации: полнота, актуальность, точность, достоверность, конфиденциальность информативность.

Примеры реализации. Программное и информационное обеспечение. База данных.

Вся информация об оцифрованных рентгеновских снимках пациентов хранится в электронном виде в базе данных (БД)[6,7,8].

Пример экранной формы для работы с фрагментами исследуемого объекта посредством анализа информативных областей на рентгеновском снимке показан на рисунке 2, выделенные на снимке синей сплошной линией,

информативные области подлежат исследованию, к которыми являются непосредственно пазухи, а глазницы, которые выделены сплошной линией красного цвета, являются эталонной информативной областью в процессе диагностического исследования и принятия решения по результатам этих исследований.

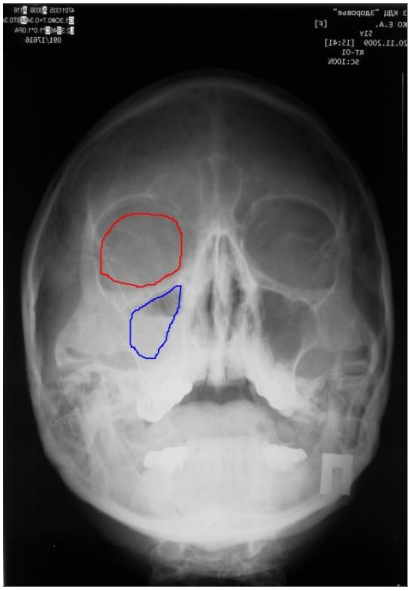


Рис. 2 Информативные области исходного изображения в процессе прохождения инструментального исследования для верификации фрагментов исследуемых объектов

Научная новизна. Результаты. Научная новизна заключается в подходе к синтезу АИС с позиции системно-информационного подхода, реализации методов верификации состояния фрагментов биологических объектов по компьютерно-томографическим изображениям и использовании для этого статистических параметров для количественной оценки состояний лобных или верхнечелюстных пазух, органов грудной клетки и их идентификации в соответствии с классом патологий при диагностике пациента в автоматическом режиме по рентгенографическим (томографическим) изображениям.

Это позволило получить следующие результаты:

1.разработано программное обеспечение, реализующее алгоритм обработки рентгенографических изображений с использованием эталонного, безэталонного и информационно-энтропийного способов диагностики по видам заболеваний (параназальных пазух при ЛОР – заболеваниях, бронхо-лёгочных заболеваниях);

2.повысилось качество обработки рентгенографических снимков и как следствие точность диагностики заболеваний[6,7,8];

3.разработанное программное обеспечение позволило повысить степень автоматизации процесса обработки рентгенографических снимков с элементами автоматической обработки, что позволяет формализовать процедуру постановки диагноза[9,10,11,12];

4.разработана - структура базы данных в виде набора связанных таблиц для хранения базовой информации о пациентах и процессе диагностики и лечении[9,10,11];

5.результаты исследований, представленные в данной работе прошли апробацию на двенадцати международных и девятнадцати Всероссийских научно технических конференциях, опубликованы в научно-технических журналах, входящих в перечень ВАК.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1.Куракова Н.А. Информатизации здравоохранения как инструмент создания «Саморегулируемой системы организации медицинской помощи». Журнал «Врач и информационные технологии» №2, 2009. –24-27 с.

2.Гостюшкин В.В. Модели и методы обработки медицинских изображений. / В.В. Гостюшкин, Н.Э. Косых, С.З. Савин – Хабаровск: Вычислительный центр ДВО РАН, 2010. – 20 с.

3.Тарасов Н.В., Проскуряков А.В. Реализация алгоритма информационно- - энтропийного анализа медицинских рентгенографических и томографических снимков. Ростов-на-Дону, Издательство Южного Федерального Университета: Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности» (ФПАКТИБ’2018) 2018, С.461-465.

4.Проскуряков А.В., Самойленко А.П. АРМ поддержки принятия решений при диагностике ЛОР- заболеваний медицинской интегрированной автоматизированной информационной диагностической системы. – Сборник трудов XI Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ’2014) 2014, С. 68-72.

5.Проскуряков А.В., Самойленко А.П. Подсистема математического и программного обеспечения поддержки принятия решений на базе способов диагностики заболеваний по рентгеновским снимкам «Медицинской автоматизированной диагностической информационной системы» Журнал «Промышленные АСУ и контроллеры». 2015. № 1 С.34-43 ISSN 1561-1531.

6.Проскуряков А.В Реализация способов диагностики заболеваний в медицинской автоматизированной информационной системе поддержки принятия решений. Владимир, Суздаль: Сборник трудов XII Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ’2016) 2016, С.303-307.

7.Проскуряков А.В, Самойленко А.П. Методология верификации состояния фрагментов биологических объектов по компьютерно-томографическим изображениям. Владимир, Суздаль: Сборник трудов XIII

Международной научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (ФРЭМЭ’2018) 2018, С.209-212.

8.Проскуряков А.В. Верификация состояния фрагментов биологических объектов по компьютерно-томографическим изображениям. Ростов, Таганрог: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко «КомТех-2019», С.169 -175.

9.Проскуряков А.В. Медицинская автоматизированная информационная система поддержки принятия решения для диагностики заболеваний с использованием верификации состояния фрагментов медико-биологических объектов по компьютерно-томографическим изображениям // Информатизация и связь. -2020 г., N3, с.55-60.

10.Проскуряков А.В. Автоматизация процесса верификации состояния фрагментов медицинских биологических объектов подсистемой поддержки принятия решений для диагностики заболеваний // «Информатизация и связь». 2021. № 8 С.85-90 doi 10.34219/2078-8320-2020-11-3-55-60 ISSN 2078-8320.

11.Проскуряков А.В. Синтез программного и информационного обеспечения реализации методов верификации состояния медицинских биологических объектов для медицинской автоматизированной информационной системы //«Известия ЮФУ». 2022. № 2 С.199-212 doi 10.18522/2911-3103-2022-2-199-212 ISSN 1999-9429.

12.Проскуряков А.В. Представление процесса диагностики заболеваний на основании верификации состояния фрагментов медицинских биологических объектов подсистемой поддержки принятия решений как автоматизированного технологического процесса // «Информатизация и связь». 2023. № 2 С.58-63 DOI: 10.34219/2078-8320-2023-14-2-58-63 ISSN 2078-8320.

BIBLIOGRAPHIC LIST

1.Kurakova N.A. Informatization of healthcare as a tool for creating a "Self-regulating system of medical care organization". The magazine "Doctor and information technologies" №2, 2009. –24-27 S.

2.Gostyushkin V.V. Models and methods of medical image processing. / V.V. Gostyushkin, N.E. Kosykh, S.Z. Savin – Khabarovsk: Computing Center FEB RAS, 2010. – 20 p.

3.Tarasov N.V., Proskuryakov A.V. Implementation of the algorithm of information-entropy analysis of medical radiographic and tomographic images. Rostov-on-Don, Southern Federal University Publishing House: Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference "Fundamental and Applied Aspects of Computer Technology and Information Security" (FPAKTIB'2018) 2018, pp.461-465.

4.Proskuryakov A.V., Samoylenko A.P. Decision support ARM for the diagnosis of ENT diseases of the medical integrated automated information diagnostic system. – Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference "Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology" (FREME'2014) 2014, pp. 68-72.

5.Proskuryakov A.V., Samoylenko A.P. Subsystem of mathematical and software support for decision-making based on methods of diagnosis of diseases by X-rays "Medical automated diagnostic information system" Journal "Industrial automated control systems and controllers". 2015. No. 1 PP.34-43 ISSN 1561-1531.

6.Proskuryakov A.V. Implementation of methods for diagnosing diseases in a medical automated information system for decision support. Vladimir, Suzdal: Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference "Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology" (FRAME'2016) 2016, pp.303-307.

7.Proskuryakov A.V., Samoylenko A.P. Methodology of verification of the state of fragments of biological objects by computer tomographic images. Vladimir, Suzdal: Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference "Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology" (FREME'2018) 2018, pp.209-212.

8.Proskuryakov A.V. Verification of the state of fragments of biological objects using computed tomographic images. Rostov, Taganrog: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation named after Professor O.N. Piavchenko "Komtech-2019", pp.169 -175.

9.Proskuryakov A.V. Medical automated information system for decision-making support for the diagnosis of diseases using verification of the state of fragments of biomedical objects using computed tomographic images // Informatization and communication. -2020, N3, pp.55-60.

10.Proskuryakov A.V. Automation of the process of verifying the state of fragments of medical biological objects by the subsystem of decision support for the diagnosis of diseases // "Informatization and communication". 2021. No. 8 PP.85-90 doi 10.34219/2078-8320-2020-11-3-55-60 ISSN 2078-8320.

11.Proskuryakov A.V. Synthesis of software and information support for the implementation of methods for verifying the state of medical biological objects for a medical automated information system //Izvestiya SFU. 2022. No. 2 pp.199-212 doi 10.18522/2911-3103-2022-2-199-212 ISSN 1999-9429.

12.Proskuryakov A.V. Presentation of the disease diagnosis process based on verification of the state of fragments of medical biological objects by the subsystem of decision support as an automated technological process // Informatization and Communication. 2023. No. 2 PP.58-63 DOI: 10.34219/2078-8320-2023-14-2-58-63 ISSN 2078-8320.

Автор: Проскуряков Александр Викторович, старший преподаватель кафедры Математического обеспечения и применения ЭВМ, Южного федерального университета, Россия, г. Таганрог, улица Энгельса,1 347900, телефон: +7(8634) 37-16-73, email: avproskuryakov@sfedu.ru.

Author: Alexander V. Proskuryakov, senior lecturer, Department of Mathematical support and computer application, southern Federal University, Russia, Taganrog, Engels street,1 347900, phone: +7(8634) 37-16-73, email: avproskuryakov@sfedu.ru.

УДК 519.688

Цветков Федор Алексеевич

ОБ ОПЫТЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ LMS-АДАПТИВНОГО КОРРЕКТОРА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА ЯЗЫКЕ LABVIEW

Целью исследования является моделирование LMS-адаптивного корректора, используемого как элемент модели приемо-передающего КВ-радиоканала, разрабатываемой на языке LabVIEW. Приводится программная модель LMS-адаптивного корректора нелинейных искажений и спектры колебаний, характеризующие ее работу.

Адаптивный корректор, нелинейное искажение, модель, LabVIEW, спектр.

Tsvetkov Fedor Alekseevich

ABOUT THE EXPERIENCE OF MODELING THE LMS ADAPTIVE NONLINEAR DISTORTION CORRECTOR IN THE LABVIEW LANGUAGE

The aim of the study is to model an LMS adaptive corrector used as an element of the HF radio channel receiving and transmitting model developed in the LabVIEW language. A software model of the LMS adaptive nonlinear distortion corrector and the oscillation spectra characterizing its operation are presented.

Adaptive corrector, nonlinear distortion, model, LabVIEW, spectrum.

Введение

При разработке модели приемо-передающего КВ-радиоканала необходимо смоделировать узел LMS-коррекции нелинейных искажений, являющийся важной частью радиоканала передачи данных. Так как модель всего радиоканала [5] разработана на языке LabVIEW, то и используемый в ее составе модуль адаптивной коррекции также необходимо выполнить на этом же языке. Разработанная модель адаптивного LMS-корректора позволяет определить параметры и оценить качество его работы.

Основная часть

Адаптивные корректоры описываются во многих литературных источниках [1, 2, 3, 4].

Наиболее простыми являются LMS-корректоры (Least-Mean-Square) нелинейных искажений, работающие следующим образом. Поток отсчетов входного сигнала $x(n)$ проходит через нелинейный безынерционный узел, на выходе которого получается искаженный по форме сигнал $d(n)$. Для восстановления формы сигнала искаженный сигнал $d(n)$ пропускается через фильтр с конечной импульсной характеристикой $w(n)$ длиной N отсчетов, которая динамически формируется в зависимости от степени искажений сигнала (динамическая адаптация). Для этого выделяется вектор данных $u(n)$ искаженного сигнала (последние N отсчетов) и сворачивается с вектором импульсной характеристики $w(n)$, в результате получается отсчет y^*

исправленного сигнала. Затем из сигнала $d(n)$ выделяется очередной вектор $u(n)$, сдвинутый по времени на один отсчет относительно предыдущего вектора, и выполнение свертки продолжается. В результате получается последовательность отсчетов $y(n)$ восстановленного сигнала. Особенностью алгоритма является то, что импульсная характеристика все время обновляется. Для этого каждый новый выходной отсчет y^* фильтра сравнивается с соответствующим отсчетом исходного сигнала x^* и находится их разность e^* , а затем обновляется текущая адаптивная импульсная характеристика $w(n)$ на величину «приращения», равного $\mu \cdot u(n) \cdot e^*$, где параметр μ подбирается небольшим для получения устойчивого процесса адаптации.

На рисунке 1 показана функциональная диаграмма программы проверки работоспособности модели LMS-коррекции нелинейных искажений, а на рисунке 2 – ее фронтальная панель.

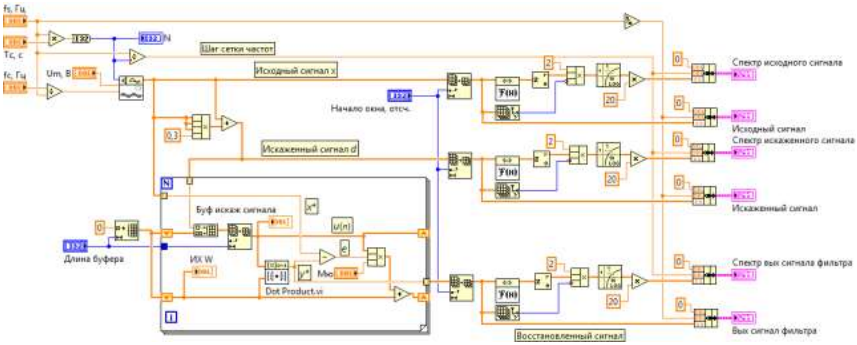


Рис. 1 Функциональная диаграмма модели

Задаваемые параметры: fs, Гц – частота дискретизации; Tc, с – длительность моделируемого сигнала; fc, Гц – частота входного сигнала; Um – амплитуда входного сигнала; Длина буфера – количество отсчетов в импульсной характеристике ИХ и векторе $u(n)$; Мю – параметр адаптации; Начало окна – отступ от начала временных диаграмм: служит для исключения влияния на спектры начальных переходных процессов; подбор отступа позволяет также подобрать длину реализаций, при которых в спектрах отсутствует эффект «растекания спектра».

Входной сигнал выбран гармонической формы, т.к. в основной программе моделирования 4GFSK-радиоканала [5] сигнал имеет форму, близкую к гармонической.

Результаты моделирования отображаются на фронтальной панели в виде временных и спектральных диаграмм:

– Буфер искаженного сигнала длиной 128 точек (последний текущий вид);

– ИХ W – импульсная характеристика фильтра (последний текущий вид);

– Исходный сигнал (фрагмент временной диаграммы и амплитудный спектр);

– Искаженный сигнал (фрагмент временной диаграммы и амплитудный спектр);

– Выходной сигнал фильтра (фрагмент временной диаграммы и амплитудный спектр).

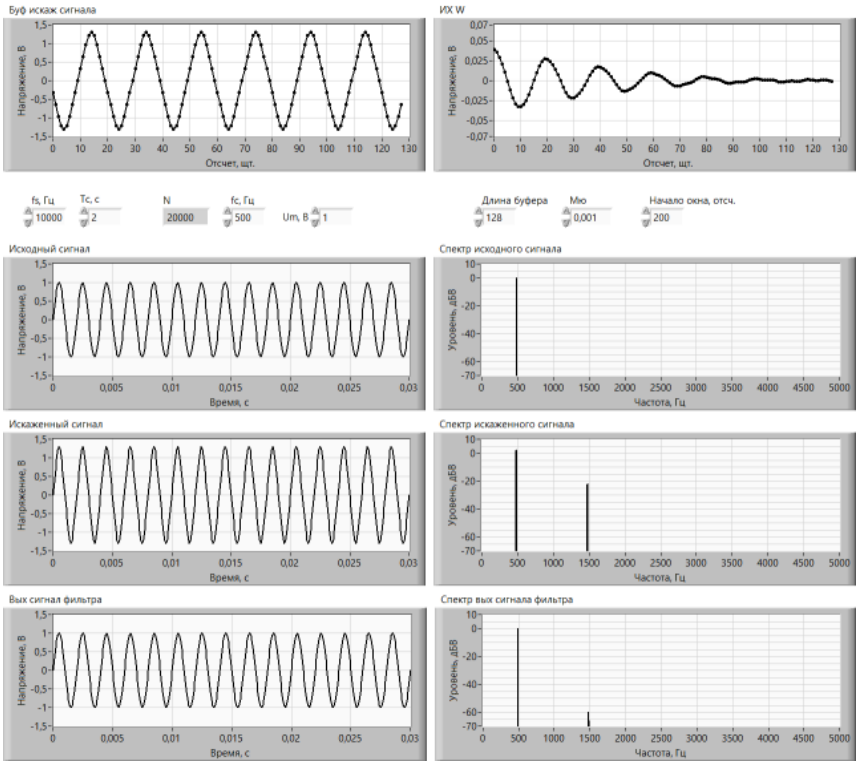


Рис. 2 Лицевая панель модели

Задавалась проходная характеристика нелинейного элемента вида

$$y = x + 0{,}3*x^3.$$

По временной диаграмме искаженного сигнала видно, что его мгновенные значения лежат в пределах ±1,3 В, а в его спектре кроме первой гармоники присутствует и третья гармоника с уровнем -22 дБВ. При этом в спектре выходного сигнала фильтра третья гармоника имеет уровень -60 дБВ, т.е. нелинейные искажения в существенной степени скорректированы.

Выводы

В проведенной работе смоделирован алгоритм адаптивного LMS-корректора нелинейных искажений в виде программы на языке LabVIEW, позволяющей наглядно представить алгоритм в графической форме, способствующей его пониманию. Показаны результаты моделирования работы LMS-корректора нелинейных искажений для частного случая входного сигнала. Программа позволяет легко изменять параметры сигнала и процесса адаптивной коррекции и визуально наблюдать его работу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. Радио и связь, 2004.

2. Morgan, D. R., Ma, Z., Kim, J., Zierdt, M. G., & Pastalan, J. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006.

3. Сергеев А.В. Адаптивные алгоритмы цифровой обработки сигналов в задачах компенсации нелинейных искажений. Вестник МЭИ, №3, 2012.

4. Simon Haykin. AdAptive Filter theory, 5th edition, ISBN 978-0-132-67145-3, published by Pearson Education, 2014.

5. Цветков Ф.А., Васильев В.В., Михайловский В.А Модель 4GFSK-канала для КВ-радиосвязи. Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении КомТех-2024», в двух томах. 2024. С. 79-90.

Автор: Цветков Федор Алексеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347900, телефон: +7 (8634) 37-16-43, email: facvetkov@sfedu.ru

Author: Tsvetkov Fedor Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, Taganrog, Russia. Nekrasovsky 44, 347900, phone: +7 (8634) 37-16-43, email: facvetkov@sfedu.ru

УДК 004.42+004.3
УДК 57.08+615.47+615.8

Проскуряков Алексей Александрович
Проскуряков Александр Викторович

РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОГО ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПНЕВМОНИЙ НА ОСНОВЕ РЕНТГЕНОВСКИХ СНИМКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GRAD-CAM++

Целью исследования является разработка устойчивого и интерпретируемого модуля на базе сверточной нейронной сети для автоматического выявления пневмонии по рентгенографическим снимкам грудной клетки. В рамках задачи проведены этапы предобработки и аугментации медицинских изображений, адаптация архитектуры ResNet50, а также реализация механизмов трансферного обучения. Полученные результаты демонстрируют высокие показатели точности и воспроизводимости (F1-мера – 0.93, AUC – 0.97), подтверждая практическую ценность предложенного подхода. Модель показывает потенциал применения в системах поддержки принятия решений в клинической диагностике.

пневмония, рентгенограмма, нейросеть, компьютерное зрение, глубокое обучение, трансферное обучение, ResNet, классификация, Grad-CAM, диагностика.

Proskuryakov Alexey Aleksandrovich
Proskuryakov Alexander Viktorovich

DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE PROTOTYPE OF A PNEUMONIA DIAGNOSTIC SYSTEM BASED ON X-RAY IMAGES USING GRAD-CAM++

The aim of the study is to develop a stable, interpretable module based on convolutional neural networks to automatically detect pneumonia from chest X-rays. As part of the task, pre-processing and image augmentation stages were carried out as well as the adaptation of the ResNet50 architecture, and the implementation of transfer learning mechanisms. The results show high accuracy (F1-measure – 0.93) and reproducibility (AUC – 0.97), confirming the practical importance of the proposed method. The model can be used in decision support systems for clinical diagnosis.

pneumonia, radiograph, neural network, computer vision, deeplearning, transfer learning, ResNet, classification, Grad – CAM, diagnostics.

Введение

Пневмония остаётся одной из наиболее распространённых причин смертности среди детей и пожилых людей во всём мире, особенно в странах с низким уровнем дохода [1]. По данным Всемирной организации

здравоохранения, до начала пандемии COVID-19 пневмония ежегодно уносила жизни более 2,5 миллионов человек, включая около 700 тысяч детей младше пяти лет. Ситуация усугубилась в период пандемии, когда острые пневмонии, в том числе вирусного происхождения, стали основным осложнением инфекции COVID-19, особенно у пожилых и пациентов с сопутствующими заболеваниями. Исследования показали, что до 15–20% госпитализированных пациентов с COVID-19 развивали тяжёлую форму вирусной пневмонии, требующую интенсивной терапии [1], [2].

Опыт пандемии продемонстрировал значительную нагрузку на системы здравоохранения и нехватку специалистов, способных оперативно интерпретировать рентгенографические исследования. В условиях эпидемий и кризисов особенно остро встаёт вопрос об автоматизации диагностики и о применении интеллектуальных систем для предварительного анализа изображений. Это способствует не только повышению скорости постановки диагноза, но и снижению вероятности врачебных ошибок в условиях перегрузки. Ранняя диагностика заболевания затруднена в условиях ограниченных медицинских ресурсов и нехватки квалифицированных радиологов. Использование алгоритмов компьютерного зрения на основе глубокого обучения открывает новые горизонты в области автоматизации диагностики, позволяя повысить точность, надёжность и воспроизводимость клинических заключений [2].

Современные методы компьютерного зрения применяются в широком спектре задач медицинской диагностики, включая распознавание опухолей, сегментацию органов, классификацию заболеваний по изображениям и т.д. Одним из наиболее перспективных направлений является анализ рентгенограмм грудной клетки, где глубокие сверточные нейронные сети (CNN) уже доказали свою эффективность [3].

Работы Rajpurkar et al. [4] и Kermany et al. [5] продемонстрировали возможность достижения точности, сопоставимой с врачами-радиологами, при использовании моделей глубокого обучения. Однако многие решения страдают от переобучения, отсутствия интерпретируемости и неспособности работать на гетерогенных данных. Цель настоящего исследования — разработать устойчивую, объяснимую и воспроизводимую модель для выявления пневмонии на рентгенографических изображениях.

Сверточные нейронные сети в медицине

Сверточные нейронные сети (CNN) являются краеугольным камнем современных подходов в компьютерном зрении, особенно в медицине. Они позволяют выявлять пространственные зависимости, локальные текстуры и аномалии в изображениях, что особенно важно при интерпретации рентгенограмм.

Традиционные архитектуры, такие как VGG и ResNet, широко использовались в медицинских задачах, но в последние годы наблюдается тенденция к применению более эффективных и глубинных моделей. Одной из таких архитектур является DenseNet, в которой каждый слой связан со всеми

последующими, обеспечивая лучшую передачу градиентов и повторное использование признаков [8]. DenseNet продемонстрировала высокую эффективность при ограниченных объёмах данных.

Ещё одним значимым направлением стало использование EfficientNet, архитектуры, разработанной с учётом автоматической оптимизации масштабирования глубины, ширины и разрешения изображений. EfficientNet достигла рекордных показателей точности при меньшем числе параметров, что особенно важно для задач, связанных с внедрением в клинические системы, где ограничены вычислительные ресурсы [9].

Альтернативы трансферному обучению

Трансферное обучение остаётся доминирующим методом при разработке моделей в медицинской визуализации из-за дефицита размеченных данных. Однако существует ряд альтернативных стратегий:

- *Обучение с нуля (from scratch).* Этот подход требует большого объёма данных и мощностей, но может быть полезен при наличии специфических изображений, не соответствующих структуре ImageNet.
- *Самообучение (self-supervised learning).* Позволяет использовать неразмеченные данные для предварительного обучения модели путём создания искусственных задач (например, предсказание поворота изображения), что потенциально снижает зависимость от меток [10].
- *Few-shot learning и meta-learning.* Эти подходы стремятся к обобщению знаний с минимальным количеством обучающих примеров, что особенно актуально в редких клинических сценариях.

Тем не менее, в настоящем исследовании выбор пал на трансферное обучение с использованием ResNet50, как одного из наиболее проверенных и устойчивых решений, продемонстрировавших отличные результаты в смежных задачах [6], [4].

CNN являются классом моделей глубокого обучения, специально разработанных для обработки изображений. Их архитектура состоит из последовательности сверточных, пуллинговых и полносвязных слоев. Сверточные слои позволяют модели эффективно выделять пространственные зависимости и локальные признаки, а пуллинговые слои снижают размерность, сохраняя наиболее важные элементы. Для медицинских изображений CNN позволяют выявлять патологические области, текстурные отклонения и аномальные паттерны, характерные для заболеваний.

Применение CNN в задачах классификации рентгенограмм стало особенно популярным после появления крупных открытых датасетов, таких как ChestX-ray14, RSNA Pneumonia Detection Challenge и др. Такие модели, как CheXNet, обученные на десятках тысяч изображений, смогли достичь точности более 90% при диагностике пневмонии [4].

Transfer Learning и ResNet

Трансферное обучение — метод, при котором модель, предварительно обученная на большой выборке (например, ImageNet), дообучается на специализированной задаче. Это особенно полезно в медицинских задачах, где объём размеченных данных ограничен. Модель ResNet50, предложенная He et al. [6], отличается наличием остаточных связей, позволяющих избежать деградации градиента при увеличении глубины сети.

Данные и предобработка

Исходный набор данных включал в себя более 5000 рентгенографических снимков грудной клетки взрослых пациентов. Снимки были разделены на два класса: «здоров» и «пневмония». При этом «пневмония» включала как вирусные, так и бактериальные формы заболевания, без уточнения этиологии. Все изображения предварительно проходили инспекцию на артефакты и низкое качество визуализации. Разрешение снимков варьировалось от 1024×1024 до 3000×3000 пикселей, что требовало унификации для подачи в модель.

Предобработка включала в себя следующие этапы:

- масштабирование изображений до 224×224 пикселей;
- нормализация интенсивности пикселей в диапазон [0, 1];
- удаление изображений с выраженными посторонними метками, символами и графическими пометками.

Аугментация данных

С целью повышения обобщающей способности модели и борьбы с переобучением была реализована обширная программа аугментации, включающая:

- горизонтальные отражения (с вероятностью 0.5);
- случайные повороты до ±15°;
- сдвиги по ширине и высоте до 10%;
- изменение яркости и контрастности в пределах допустимых медицинской практикой значений.

Аугментация проводилась в реальном времени на этапе обучения, с помощью генератора изображений (ImageDataGenerator в Keras), что позволило значительно разнообразить обучающий поток и минимизировать зависимость от конкретных примеров.

Архитектура модели

Базой классификатора была выбрана модель ResNet50 с предварительно обученными весами на ImageNet. Эта архитектура сочетает в себе глубину (50 слоёв) и устойчивость к градиентному затуханию за счёт остаточных соединений. В рамках доработки архитектура была адаптирована под задачу бинарной классификации следующим образом:

- удалены исходные выходные слои;
- добавлены слои GlobalAveragePooling2D и BatchNormalization;
- внедрён слой Dropout с коэффициентом 0.5 для регуляризации;
- добавлен полносвязный слой на 256 нейронов с активацией ReLU;
- выходной слой — один нейрон с сигмоидной функцией активации.

Разделение данных и стратегия кросс-валидации

Модель обучалась на 70% выборки, валидация проводилась на 15%, а тестирование — на оставшихся 15%. При этом применялась стратифицированная 5-кратная кросс-валидация с исключением повторов пациентов между подвыборками.

Настройка гиперпараметров и стратегия обучения

Обучение проводилось в два этапа: сначала с замороженными слоями базы ResNet50, затем с их частичной разморозкой. Использовались Adam-оптимизатор с learning rate 1e-4 (позже 1e-5), binary crossentropy с учётом дисбаланса классов, ранняя остановка, адаптивное снижение скорости обучения и контроль лучших весов по метрике валидационной F1-меры [11, 12].

Оценка производительности

По итогам тестирования средние метрики составили:

Таблица 1

Значения метрик при оценивании качества модели

Метрика	Значение
Accuracy	0.935
Precision	0.918
Recall	0.944
F1-score	0.931
ROC AUC	0.973

Интерпретируемость модели

Выводы

Разработанная нейросетевая архитектура на базе ResNet50 продемонстрировала высокую точность и стабильность в задаче автоматической диагностики пневмонии по рентгенограммам. За счёт тщательной подготовки данных, применения методов аугментации, трансферного обучения и регуляризации удалось достичь высоких метрик качества (F1-score > 0.93, AUC > 0.97), что сопоставимо с результатами, достигаемыми специалистами-радиологами. Применение Grad-CAM позволило интерпретировать модель, повысив её клиническую приемлемость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. UNICEF. Pneumonia claims the lives of the most vulnerable children. URL: https://www.unicef.org/stories/pneumonia-claims-lives-most-vulnerable-children (дата обращения: 06.04.2025).

2. Litjens G., Kooi T., Bejnordi B. E. et al. A survey on deep learning in medical image analysis // Medical Image Analysis. — 2017. — Vol. 42. — P. 60–88.

3. Lundervold A. S., Lundervold A. An overview of deep learning in medical imaging focusing on MRI // Z Med Phys. — 2019. — Vol. 29, № 2. — P. 102–127.

4. Rajpurkar P., Irvin J., Zhu K. et al. CheXNet: Radiologist-Level Pneumonia Detection on Chest X-Rays with Deep Learning // arXiv preprint arXiv:1711.05225. — 2017.

5. Kermany D. S., Goldbaum M., Cai W. et al. Identifying Medical Diagnoses and Treatable Diseases by Image-Based Deep Learning // Cell. — 2018. — Vol. 172, № 5. — P. 1122–1131.e9.

6. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. — 2016. — P. 770–778.

7. Selvaraju R. R., Cogswell M., Das A. et al. Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-Based Localization // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. — 2017. — P. 618–626.

8. Huang G., Liu Z., Van Der Maaten L., Weinberger K. Q. Densely connected convolutional networks // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2017. — P. 4700–4708.

9. Tan M., Le Q. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks // Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning. — 2019. — P. 6105–6114.

10. Chen T., Kornblith S., Norouzi M., Hinton G. A simple framework for contrastive learning of visual representations // Proceedings of the 37th International Conference on Machine Learning. — 2020. — P. 1597–1607.

11. Shorten C., Khoshgoftaar T. M. A survey on image data augmentation for deep learning // Journal of Big Data. — 2019. — Vol. 6, № 1. — P. 1–48.

12. Tajbakhsh N., Jeyaseelan L., Li Q. et al. Embracing Imperfect Datasets: A Review of Deep Learning Solutions for Medical Image Segmentation // Medical Image Analysis. — 2020. — Vol. 63. — 101693.

Автор: Проскуряков Александр Викторович, старший преподаватель кафедры МОП ЭВМ Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Энгельса, 1, 347900, телефон: +7 950 846-72-87, email: avproskuryakov@sfedu.ru.

Автор: Проскуряков Алексей Александрович, студент группы КТбо3-4 кафедры Систем автоматизированного проектирования, Южного федерального университета, Россия, г.Таганрог, улица Розы Люксембург, 44, кв.65 3479000, телефон:+7(952) 417-64-70, email: proskuriakov@sfedu.ru.

Author: Proskuryakov Alexander Victorovich, senior lecturer, Department of Mathematical support and computer application, southern Federal University, Russia, Taganrog, Engels street, 1, 347900, phone: +7(8634) 37-16-73, email: avproskuryakov@sfedu.ru.

Author: Proskuryakov Alexey Alexandrovich, student of the Msw group 3-4 of the Department of Computer-aided Design Systems, Southern Federal University, 44 Rosa Luxemburg Street, 65 3479000, Taganrog, Russia, phone: +7(952) 417-64-70, email:proskuriakov@sfedu.ru.

УДК 004.942

Галиев Данияр Ильнурович

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

В современном мире высокоточные методы прогнозирования приобретают важное значение в различных областях. Точные прогнозы позволяют принимать обоснованные решения, оптимизировать ресурсы и минимизировать риски. Некоторые традиционные методы прогнозирования, которые основаны на статистическом анализе и экспертных оценках, зачастую по итогу оказываются неэффективными в условиях сложных и нелинейных зависимостей. Методы искусственного интеллекта (ИИ) представляют собой перспективный инструмент для разработки высокоточных методов прогнозирования, которые способны учитывать большое количество факторов и выявлять скрытые закономерности в данных. Актуальность данной работы связана с необходимостью разработки и внедрения новых подходов к прогнозированию, выявить их преимущества и недостатки [1]. Цель данной работы – определить наиболее перспективные модели ИИ для решения задач прогнозирования и провести сравнительный анализ.

Прогнозирование, временной ряд, нейронная сеть.

Galiev Daniyar Ilnurovich

COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIOUS TIME SERIES FORECASTING METHODS

In today's world, high-precision forecasting methods are becoming important in various fields. Accurate forecasts allow you to make informed decisions, optimize resources and minimize risks. Some traditional forecasting methods, which are based on statistical analysis and expert assessments, often end up being ineffective in conditions of complex and nonlinear dependencies. Artificial intelligence (AI) methods represent a promising tool for developing highly accurate forecasting methods that can take into account a large number of factors and identify hidden patterns in data. The relevance of this work is related to the need to develop and implement new approaches to forecasting, to identify their advantages and disadvantages [1]. The purpose of this work is to identify the most promising AI models for solving forecasting problems and to conduct a comparative analysis.

Forecasting, time series, neural network.

Введение. Применение нейронных сетей в задаче прогнозирования обусловлено их способностью автоматически выявлять сложные зависимости в данных и обобщать информацию из прошлого опыта для предсказания будущих событий. Опишем некоторые модели ИИ, применяемые в прогнозировании.

Нейронные сети – это вычислительные модели, которые вдохновлены структурой и функциями биологических нейронных сетей. Они состоят из взаимосвязанных узлов, то есть нейронов, которые организованы в слои. Информация проходит через сеть, где каждый нейрон обрабатывает входящие

данные и передает результаты дальше. Нейронные сети имеют способность к обучению на больших наборах данных и могут выявлять сложные нелинейные зависимости [2].

Типы нейронных сетей. Многослойный персептрон (MLP) – это один из наиболее распространенных типов нейронных сетей, которые состоят из нескольких слоев нейронов, каждый из которых связан со всеми нейронами соседних слоев. MLP обычно используется для решения задач классификации и регрессии, и может применяться для прогнозирования временных рядов и других типов данных [3].

Рекуррентные нейронные сети (RNN) – это тип нейронных сетей, которые предназначены для обработки последовательных данных, таких как временные ряды или текст. Они обладают некой памятью, которая позволяет им учитывать предыдущие значения при обработке текущего. RNN очень эффективны для прогнозирования временных рядов, где важна зависимость между последовательными значениями [4].

Долгая краткосрочная память (LSTM) – это разновидность RNN, которая разработана для решения проблемы так называемого «затухания градиента» (проблема обучения глубоких нейронных сетей, при которой градиенты становятся экспоненциально малыми при распространении через множество слоев), которая может возникать при обучении длинных последовательностей. LSTM обладает специальными инструментами, которые позволяют ему сохранять и обновлять информацию в памяти, что делает его более эффективным для прогнозирования временных рядов с долгосрочными зависимостями [5].

SVM – это машины опорных векторов, где алгоритмы машинного обучения используются для классификации и регрессии. Они строят оптимальную разделяющую гиперплоскость между классами в случае классификации или же находят оптимальную функцию регрессии. SVM обладают хорошей обобщающей способностью и могут эффективно работать с данными высокой размерности. Эти алгоритмы могут быть использованы для прогнозирования, применяя метод регрессии, который стремится найти функцию, максимально приближающую данные и при этом минимизируя ошибку [6].

Деревья решений (DT) – это древовидные структуры, которые используются так же для классификации и регрессии. Каждый узел дерева представляет собой вопрос или условие, которое основано на одном из входных признаков, а ветви представляют собой возможные ответы или исходы. Деревья решений просты в интерпретации и могут эффективно обрабатывать данные с разными типами признаков. Случайный лес (RF) – это уже метод, который состоит из множества деревьев решений. Каждое дерево обучается на случайной подвыборке данных и использует случайный набор признаков. Результат прогнозирования получается путем усреднения прогнозов всех деревьев. RF обладает высокой точностью и устойчивостью к переобучению [7].

Сравнительный анализ. Проведем сравнительный анализ (табл. 1) различных моделей ИИ. Важно помнить, что выбор наиболее подходящей модели зависит от конкретной задачи и характеристики данных [8].

Таблица 1

Сравнительный анализ моделей ИИ

Модель ИИ	Применение	Преимущества	Недостатки
MLP	Прогнозирование временных рядов, классификация, регрессия	- высокая точность; - способность к обучению нелинейным зависимостям	- требует большого объема данных; - подвержен переобучению
RNN/LSTM	Прогнозирование временных рядов, анализ текста, распознавание речи	- эффективен для обработки последовательных данных; - учитывает временные зависимости	- требует большого объема данных; - сложен в обучении
SVM	Прогнозирование, классификация, регрессия	- хорошая обобщающая способность; - эффективен с данными высокой размерности	- требует выбора ядра и параметров
DT/RF	Прогнозирование, классификация, регрессия	- прост в интерпретации; - может обрабатывать разные типы признаков; - устойчив к переобучению	- деревья решений могут быть нестабильными; - требует настройки параметров

Традиционные методы прогнозирования, такие как скользящее среднее и экспоненциальное сглаживание, просты в реализации и требуют небольшого объема данных, но они не способны учитывать сложные нелинейные зависимости и внешние факторы.

Методы же искусственного интеллекта требуют большого объема данных и вычислительных ресурсов, но способны выявлять скрытые закономерности и могут обеспечить более высокую точность прогнозирования в сложных условиях.

В таблицах ниже представлены результаты экспериментов, которые сравнивают точность моделей ИИ и традиционных методов прогнозирования в различных областях. В качестве метрик оценки используются: RMSE (корень из среднеквадратичной ошибки), MAE (средняя абсолютная ошибка) и MAPE

(средняя абсолютная процентная ошибка). В каждой из метрик оценки меньшее значение будет указывать на более высокую точность [9, 10].

Для прогнозирования в качестве признака будет использоваться входная данная – цена закрытия (Close) акции «Татнефть». Данные взяты за последние 5 лет из Московской Биржы (MOEX), где предоставлены исторические данные в различных форматах. Все расчеты были проведены на языке программирования Python.

Таблица 2

Прогнозирование цены закрытия акций «Татнефть»

Метод	RMSE	MAE	MAPE
ARIMA	15,5	12,75	2,85%
Экспоненциальное сглаживание	16,2	13,5	3%
Логистическая регрессия	20,0	16,5	3,5%
SVM	12,0	9,5	2,1%
LSTM	11,25	9,0	2%
RNN	12,5	10,25	2,25%
RF	13,75	11,0	2,5%
MLP	13,0	10,75	2,4%

Выводы. Результаты эксперимента показали, что модели ИИ лучше традиционных методов прогнозирования по точности. LSTM и SVM обычно обеспечивают более высокую точность прогнозирования. ARIMA и экспоненциальное сглаживание могут быть полезны для простых временных рядов, но их точность может быть ниже, чем у более сложных моделей. RNN, RF и MLP заняли промежуточное положение, показав некий баланс между точностью и сложностью в вычислениях. Конечно же, нужно отметить то, что точность прогнозирования зависит от качества и объема данных, а также от правильного выбора и настройки параметров моделей искусственного интеллекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чирихин К.С., Рябко Б. Я. Применение методов искусственного интеллекта и сжатия данных для прогнозирования социальных, экономических и демографических показателей новосибирской области // ЖВТ (2020). №5.

2. Гафаров Ф.М., Гилемзянов А.Ф. Нейронные сети в PyTorch: Учебное пособие / Ф.М. Гафаров, А.Ф. Гилемзянов. – Казань: Казанский федеральный университет (2024). – 106 с.

3. Быканов Н.П. Реализация многослойного персептрона и сети адаптивного резонанса (2016). URL: https://moluch.ru/conf/tech/archive/166/10827/

4. Бендерская Е.Н., Никитин К.В. Рекуррентная нейронная сеть как динамическая система и подходы к ее обучению (2013). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rekurrentnaya-neyronnaya-set-kak-dinamicheskaya-sistema-i-podhody-k-ee-obucheniyu/viewer

5. Vaswani A. et al. Attention is All you Need. Neural Information Processing Systems (2017). URL: https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/file/3f5ee243547dee91fbd053c1c4a845aa-Paper.pdf

6. Шумков Д.С. Разработка и исследование методов прогнозирования на основе SVM-моделей (2009). URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01004629878.pdf

7. Breiman L. Random forests. Machine Learning (2001). URL: https://www.stat.berkeley.edu/~breiman/randomforest2001.pdf

8. Чернышова Г.Ю., Самаркина Е.А. Методы интеллектуального анализа данных для прогнозирования финансовых временных рядов (2019). URL: https://old-eup.sgu.ru/sites/eup.sgu.ru/files/2019/06/galina_yu._chernyshova_181-188.pdf

9. Шишков Е.М., Проничев А.В., Савельев А.А. Прогнозирование временных рядов с применением методов машинного обучения на примере графика выдачи мощности электрической станции (2022). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-vremennyh-ryadov-s-primeneniem-metodov-mashinnogo-obucheniya-na-primere-grafika-vydachi-moschnosti-elektricheskoy/viewer

10. Морозова, В. И. Прогнозирование методом машинного обучения // Молодой ученый (2022). URL: https://moluch.ru/archive/416/92048/

Автор: Галиев Данияр Ильнурович, аспирант, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт вычислительной математики и информационных технологий, Россия, Республика Татарстан, город Казань, улица Кремлевская 35, 420008, телефон: +79393902476, email: daniyargalievi@gmail.com.

Author: Galiev Daniyar Ilnurovich, PhD student, Kazan (Volga Region) Federal University, Institute of Computational Mathematics and Information Technology, 35 Kremlevskaya Street, Kazan, 420008, Republic of Tatarstan, Russia, phone: +79393902476, email: daniyargalievi@gmail.com.

УДК 004.89

Волощук Вадим Игоревич, Гаджиев Тимур Эфлетдинович, Боваев Арслан Батырович, Пашковский Руслан Юрьевич, Шушарина Мария Аркадьевна, Мячина Юлия Андреевна, Калашникова Татьяна Григорьевна

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ, АДАПТАЦИИ И ВЕРСИОНИРОВАНИЯ ОНЛАЙН-КУРСОВ НА ОСНОВЕ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ СЕМАНТИЧЕСКОГО ПОИСКА

*Аннотация. В статье рассмотрена концепция интеллектуальной платформы **NeuroLearn** для автоматизированной генерации, адаптации и версионирования онлайн-курсов на базе современных больших языковых моделей (LLM) и методов семантического поиска. Описаны проблемы длительного и трудоёмкого процесса разработки учебных программ и необходимости их регулярного обновления. Предложенная платформа использует возможности генеративного ИИ для ускорения создания структуры курсов и учебного материала, а также обеспечивает механизм семантического поиска по базе знаний для точного дополнения контента актуальными данными. В архитектуре **NeuroLearn** выделены три ключевых компонента: клиентский интерфейс для разработчиков курсов (ciFront), серверная часть (ciBack), отвечающая за управление данными и взаимодействие, и модуль искусственного интеллекта (ciML), интегрирующий LLM и семантический поиск. Представлены результаты прототипирования системы: схема архитектуры, пример работы генерации содержания курса и функциональная таблица компонентов платформы.*

Ключевые слова: генеративные модели, большие языковые модели, онлайн-обучение, семантический поиск, версионирование контента, объяснимый ИИ, автоматическая генерация курсов.

Voloshchuk Vadim Igorevich, Gadzhiev Timur Efletdinovich. Bovaev Arslan Batyrovich, ashkovskiy Ruslan Yuryevich, Myachina Yulia Andreyevna, Shusharina Maria Arkadyevna, Kalashnikova Tatyana Grigoryevna

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT PLATFORM FOR GENERATION, ADAPTATION AND VERSIONING OF ONLINE COURSES BASED ON LANGUAGE MODELS AND SEMANTIC SEARCH METHODS

*Abstract. The paper presents the concept of an intelligent platform **NeuroLearn** for automated generation, adaptation and versioning of online courses, leveraging modern large language models (LLMs) and semantic search methods. It addresses the challenges of the lengthy and labor-intensive process of developing educational curricula and the need for their frequent updates. The proposed platform uses generative AI capabilities to accelerate the creation of course structures and content, and provides a semantic search mechanism over a knowledge base to accurately enrich the generated materials with up-to-date information. The **NeuroLearn** architecture consists of three key components: a client interface for*

course designers (ciFront), a backend server (ciBack) responsible for data management and system coordination, and an AI module (ciML) integrating an LLM and semantic search. The results of the system prototyping are presented, including the architecture diagram, an example of course content generation, and a functional table of the platform's components.

Keywords: generative models, large language models, online learning, semantic search, content versioning, explainable AI, automatic course generation.

Введение

Разработка качественного онлайн-курса традиционно требует значительных временных и человеческих ресурсов. Необходимо сформировать структуру курса, написать содержательный материал для каждой темы, подготовить методические указания и проверочные задания. Кроме того, в условиях быстрого устаревания информации курсы требуют регулярной актуализации и создания новых версий под различные аудитории. В итоге полный цикл создания учебной программы может занимать несколько месяцев напряженной работы экспертов. При этом процесс трудно автоматизировать без потери качества, поскольку он включает творческие задачи проектирования учебного контента.

Недавние исследования показывают, что LLM могут имитировать работу экспертов-методистов и значительно ускорить получение качественного учебного материала для студентов. Коммерческие сервисы уже начинают предлагать инструменты автогенерации курсов. Так, прототип **Course AI** способен по теме курса автоматически сгенерировать план занятий, содержание уроков и контрольные вопросы. Однако подобные решения пока далеки от совершенства: они часто нестабильны, могут работать только на английском языке и выдают относительно поверхностный контент, требующий доработки педагогом. Тем не менее, потенциал таких систем очевиден – с их помощью возможно создание чернового варианта курса за считанные часы, тогда как без ИИ на это ушли бы недели.

В данной работе предлагается интеллектуальная платформа **NeuroLearn**, предназначенная для генерации, адаптации и версионирования онлайн-курсов на основе языковых моделей и семантического поиска. В отличие от существующих простых генераторов, **NeuroLearn** интегрирует **генеративный ИИ** (LLM) с возможностями **поиска по знаниям**, что позволяет не только автоматически создавать структуру и содержание курсов, но и дополнять их актуальными данными, а также объяснять полученный результат. Платформа нацелена на поддержку преподавателей и методистов в быстром прототипировании новых курсов, обновлении уже имеющихся учебных материалов и кастомизации контента под разные цели обучения.

Постановка задачи

Для эффективной генерации и сопровождения онлайн-курсов платформа **NeuroLearn** должна удовлетворять ряду требований. Во-первых, необходим механизм **автоматического порождения структуры курса**. Пользователь

(методист) задаёт тему или ключевые понятия курса, после чего система должна сформировать иерархию модулей и уроков. Для решения этой задачи применяется языковая модель, способная генерировать логично структурированный учебный план. Во-вторых, платформа должна обеспечивать **генерацию учебного контента** – текстов лекций, пояснений, примеров, вопросов для самопроверки. Этот контент должен быть связным, корректным и соответствовать методическим требованиям. В-третьих, необходима возможность **адаптации контента** – изменения стиля, глубины проработки материала, подстраивания под уровень подготовки конкретной группы студентов. Например, на основе одной базовой версии курса система должна автоматически создавать упрощенный вариант для начинающих или углубленный для продвинутых. В-четвертых, платформа должна поддерживать **версионирование**: хранение нескольких версий курса с фиксацией изменений. Это позволит преподавателям отслеживать эволюцию курса, возвращаться к предыдущим версиям или готовить специальные издания курса (например, под разные специализации), не начиная работу с нуля.

Еще одно важное требование – интеграция **семантического поиска** по релевантным источникам знаний. Генерируя учебные материалы, система должна иметь доступ к актуальной информации из внешних ресурсов (научных статей, баз знаний в предметной области, ранее созданных курсов). Встроенный поиск с использованием векторных представлений (эмбеддингов) позволит находить сведения по смысловому соответствию, а не только по ключевым словам, что значительно повышает качество и точность дополняющего контента. Например, при создании курса по кибербезопасности платформа сможет автоматически найти последние данные о новых типах атак или статистику инцидентов, даже если эти конкретные формулировки не были напрямую заданы автором курса.

Наконец, система должна обладать средствами **объяснимости результатов**. Поскольку генеративные модели могут допускать неточности или **«галлюцинации»**, важно предоставить пользователю инструменты для проверки и понимания сгенерированного материала. В платформе **NeuroLearn** это реализуется через сохранение ссылок на источники, использованные для дополнения текста, и через возможность запрашивать у модели разъяснения по тому или иному фрагменту. Концепция объяснимого ИИ предполагает, что алгоритмы будут предоставлять понятные человеку объяснения своей работы. В контексте учебного курса это может быть реализовано, например, в виде комментариев системы: какие именно материалы (статьи, разделы учебников) были взяты за основу при генерации конкретного абзаца, или почему в структуру курса включены те или иные темы. Это повышает доверие преподавателей к автоматической генерации и облегчает верификацию контента перед публикацией курса студентам.

Архитектура системы

Разработанная архитектура платформы **NeuroLearn** имеет многоуровневую модульную организацию (рис. 1). Выделены три основных компонента системы: **ciFront** (Frontend UI) – клиентский интерфейс, **ciBack**

(Backend) – серверная часть, и **ciML** (AI Module) – модуль искусственного интеллекта. Такая декомпозиция упрощает разработку и масштабирование системы, позволяя независимо модифицировать пользовательский интерфейс, серверную логику и алгоритмы машинного обучения.

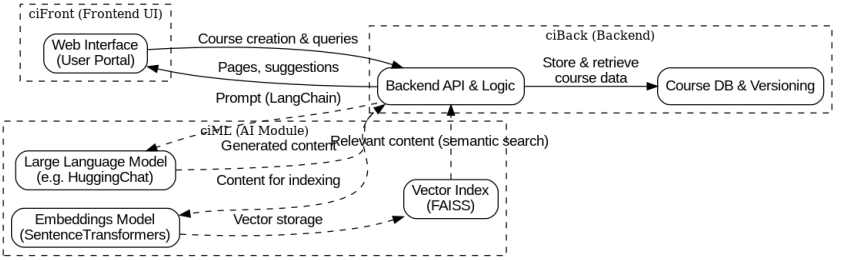


Рис. 1. Архитектура платформы **NeuroLearn** *с выделением основных компонентов и их взаимодействия.*

В архитектуре предусмотрен веб-интерфейс **ciFront** для взаимодействия с пользователем-методистом, серверный слой **ciBack** для управления данными курса и вызова сервисов, а также модуль **ciML**, осуществляющий все вычисления, связанные с ИИ. Пользователь с помощью браузера работает с **Web Interface** (веб-порталом платформы), где может вводить тему курса, настраивать параметры генерации (например, желаемую продолжительность курса, уровень сложности) и просматривать результаты –сгенерированные планы занятий, тексты уроков, диаграммы структуры курса и т.д. Этот фронтенд реализован как веб-приложение. В прототипе платформы выбран стек с использованием Python-фреймворка Flask с шаблонизатором **Jinja2**, что позволяет динамически формировать HTML-страницы на сервере. Jinja2-шаблоны используются как для отображения готового контента курса, так и для генерации пользовательских форм ввода и интерфейсов визуализации (например, графа связей между модулями курса).

Все пользовательские действия на фронтенде передаются в **ciBack** – центральный серверный компонент, отвечающий за логику приложения. **Backend API & Logic** реализует RESTful API, через который фронтенд отправляет запросы: например, запрос на генерацию структуры курса, на дополнение контента, на сохранение новой версии курса или на поиск информации. Бэкенд выполняет аутентификацию пользователя, управляет сессиями и обращается к базе данных **Course DB**, где хранится информация о созданных курсах, их версиях, а также о профилях пользователей. В системе предусмотрено сохранение древовидной структуры курса (разделы, подтемы, уроки) и связанного с каждым элементом содержимого (тексты, изображения, тестовые вопросы и пр.). Также база хранит метаданные: даты создания и изменения, авторов правок, ссылки на использованные источники и пр. Для реализации версиирования используется либо специальная структура таблиц, либо интеграция с системой контроля версий (например, Git) для хранения изменений в содержании курса.

Ключевой задачей backend-слоя является маршрутизация запросов, требующих выполнения AI-вычислений, в модуль **ciML**. Например, при запросе «сгенерировать план курса по теме X» бэкенд формирует задачу и отправляет ее на обработку в модуль искусственного интеллекта. Компоненты ciBack и ciML могут взаимодействовать через внутренний API или очередь сообщений; в нашем случае реализован синхронный вызов функций Python-модуля ciML из backend Flask-приложения (при развертывании на нескольких серверах возможна коммуникация через gRPC или HTTP).

Модуль **ciML** инкапсулирует все методы, связанные с использованием языковой модели и семантического поиска. Он состоит из нескольких подмодулей: во-первых, **Large Language Model** – непосредственная LLM, выполняющая генерацию текста. В прототипе платформы используется открытая модель на основе семейства LLaMA, развёрнутая через API проекта **HuggingChat** от Hugging Face. HuggingChat представляет собой открытую альтернативу ChatGPT, способную решать широкий спектр задач генерации текста, программирования и ответа на вопросы (модель ~30 млрд параметров). Во-вторых, подмодуль **Embeddings Model** – модель для получения векторных представлений текста. Мы применяем библиотеку **SentenceTransformers**, предоставляющую набор предобученных трансформеров для многоканального семантического представления предложений. Такая модель преобразует любой фрагмент текста (например, абзац учебного материала или вопрос студента) в высокоразмерный вектор признаков, отражающий смысловое содержание. В-третьих, подмодуль **Vector Index** – хранилище эмбеддингов на основе библиотеки **FAISS** (Facebook AI Similarity Search). FAISS позволяет эффективно выполнять поиск ближайших соседей среди миллионов векторов за считанные миллисекунды. В нашем случае в FAISS-индексе хранятся эмбеддинги двух типов: (1) эмбеддинги всех сгенерированных системой учебных материалов (для возможности быстрого поиска по ранее созданным курсам) и (2) эмбеддинги внешних источников (например, загруженных методистом документов, статей из открытых библиотек), которые могут быть полезны для дополнения курса.

Алгоритм взаимодействия компонентов следующий. Когда пользователь инициирует генерацию контента, backend формирует **промпт** для LLM – текстовое задание, включающее всю необходимую информацию (тему курса, список желаемых модулей, стиль изложения и т.п.). На этом этапе активно используется **фреймворк LangChain**, позволяющий шаблонизировать и организовывать сложные последовательности промптов. Например, генерирование курса может выполняться в несколько шагов: сначала LLM получает промпт с просьбой выделить основные модули по теме, затем – по каждому модулю перечислить подтемы, после чего для каждой подтемы – сгенерировать развернутый конспект урока. LangChain упрощает реализацию таких многошаговых цепочек и интеграцию моделей с инструментами (в нашем случае – с базой знаний через поиск). После подготовки промпта backend обращается к LLM (через ciML) – **Prompt (LangChain)** на рис. 1 – и получает от модели сгенерированный фрагмент контента (например, текст урока или

список тем). Далее backend может пост-обработать результат – например, отформатировать списки, разнести текст по структуре курса – и сохраняет данные в базу, отдавая их фронтенду для отображения.

Особенность **NeuroLearn** – включение шага семантического поиска при генерации. Если для заданной темы в базе знаний найдены релевантные материалы, система извлекает топ-N наиболее близких по смыслу фрагментов через модуль **Vector Index (FAISS)**, куда previamente загружены эмбеддинги источников. Это реализует подход **Retrieval-Augmented Generation (RAG)** – «генерация с поисковым дополнением». В промпт LLM эти фрагменты подставляются как справочная информация, благодаря чему модель в ответе опирается на конкретные факты из базы данных знаний, а не только на параметры собственной нейросети. Все новые тексты мгновенно проходят через модуль эмбеддингов и добавляются в FAISS-индекс, становясь доступными для семантического поиска.

Результаты и примеры использования

На текущий момент разработан прототип платформы **NeuroLearn** и проведено его тестирование на ряде примеров. Важной функциональной возможностью является **версионирование**. В прототипе реализовано сохранение истории изменений по каждому блоку контента. Пользователь может в любой момент сохранить текущую версию курса (например, «v1.0 – базовая генерация», «v1.1 – исправлены определения», «v2.0 – адаптация под новую программу 2024 г.») с коротким комментарием. Все версии доступны для сравнения: различия в тексте подсвечиваются, что удобно при командной работе над курсом. Семантический поиск ускоряет внесение обновлений: например, при переходе курса на новую версию стандартов, методист загружает документ с описанием этих стандартов, после чего система находит, какие места курса затрагивают устаревшие стандарты, и предлагает переписать соответствующие фрагменты с учетом новых данных.

Отметим, что интеграция модели **LangChain** и методов RAG дала положительный эффект на качество генерируемого контента. Без использования поиска модель иногда допускала устаревшие или ошибочные факты. С подключением актуальных источников через семантический поиск число неточностей уменьшилось.

Выводы

Разработана интеллектуальная платформа **NeuroLearn** для автоматизации процесса создания и сопровождения онлайн-курсов на основе современных AI-технологий. Платформа объединяет генеративные возможности больших языковых моделей с механизмами семантического поиска, что позволяет автоматически формировать структуру курса, генерировать содержательные учебные тексты и обновлять их с опорой на актуальные источники знаний.

В дальнейшем планируется расширять функциональность платформы. Интересным направлением является интеграция мультимодальных возможностей: генерация не только текста, но и изображений и видеороликов, что сделает курс более наглядным. Также ведется работа над улучшением качества взаимодействия с пользователем – внедрением интеллектуальных

ассистентов подсказок при редактировании (suggestions) и системы рекомендаций по улучшению курса на основе анализа успешности студентов. С научной точки зрения представляет интерес задача адаптации языковой модели под образовательный домен: специализированная дообученная LLM может генерировать более методически выверенные тексты и решения задач. Еще одно направление – использование данных об успеваемости студентов для автоматического **обучения** модели улучшать курс (reinforcement learning by feedback), что замыкает цикл непрерывного улучшения контента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Константинова Л. В., Ворожихин В. В., Петров А. М., Титова Е. С., Штыхно Д. А. Генеративный искусственный интеллект в образовании: дискуссии и прогнозы // **Открытое образование**. — 2023. — Т. 27, № 2. — С. 36–48. — DOI 10.21686/1818-4243-2023-2-36-48.

2. Минуллин Д. А., Гафаров Ф. М. Анализ моделей машинного обучения на основе методов объяснимого искусственного интеллекта в образовательной аналитике // **Электронные библиотеки**. — 2024. — Т. 27, № 3. — С. 294–315. — DOI 10.26907/1562-5419-2024-27-3-294-315.

3. Никольский В. С., Иваненко Е. Н. ChatGPT в высшем образовании и науке: угроза или ценный ресурс? // **Высшее образование в России**. — 2023. — Т. 32, № 4. — С. 9–22. — DOI 10.31992/0869-3617-2023-32-4-9-22.

4. Валкова Ю. Е. Использование технологий искусственного интеллекта для подготовки научных текстов // **Информатика и образование**. — 2024. — Т. 39, № 6. — С. 38–52.

5. Сысоев П. В., Филатов Е. М. Чат-боты в обучении иностранному языку: преимущества и спорные вопросы // **Вестник МГПУ. Серия: Информатика и информатизация образования**. — 2023. — № 3 (65). — С. 66–72. — DOI 10.20310/1810-0201-2023-28-1-66-72.

6. Brown F., Li M., Singh P. Retrieval-Augmented Generation (RAG) Chatbots for Education: A Survey of Applications // **Applied Sciences**. — 2023. — Vol. 15, No 8. — Art. 4234. — DOI 10.3390/app15084234.

7. Liu W., Zhang K., Chen J. Retrieval-Augmented Generation for Educational Applications: A Systematic Survey // **Computers and Education: Artificial Intelligence**. — 2024. — Vol. 5. — Art. 100213. — DOI 10.1016/j.caeai.2024.100213.

8. Ahmad K., Chen A., Valadez C. Integrating Small Language Models with Retrieval-Augmented Generation: A Guide for Practitioners // **ACM Trans. Inf. Syst.** — 2025. — Vol. 43, No 3. — Art. 69. — DOI 10.1145/3641554.3701844.

9. Lee Y. Developing a Computer-Based Tutor Utilizing Generative Artificial Intelligence and Retrieval-Augmented Generation // **Education and Information**

Technologies. — 2025. — Vol. 30. — P. 7841–7862. — DOI 10.1007/s10639-024-13129-5.

10. Henkel O., Levonian Z., Li C., Postle M. Retrieval-Augmented Generation to Improve Math Question-Answering: Trade-offs Between Groundedness and Human Preference // **Proc. 17th Int. Conf. on Educational Data Mining (EDM 2024)**. — Atlanta, 2024. — P. 315–320. — DOI 10.5281/zenodo.12729824.

Автор: Гаджиев Тимур Эфлетдинович, магистрант 2 курса, старший лаборант, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Россия, Ростов-на-Дону, tgadzhiev@sfedu.ru.

Автор: Боваев Арслан Батырович, магистрант 1 курса, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», bovaev@sfedu.ru.

Автор: Пашковский Руслан Юрьевич, магистрант 1 курса, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», fleurfeel7@gmail.com.

Автор: Мячина Юлия Андреевна, студентка 3 курса, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», miachina@sfedu.ru.

Автор: Шушарина Мария Аркадьевна, студентка 3 курса, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», shusharina@sfedu.ru.

Автор: Волощук Вадим Игоревич, магистрант 1 курса, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», vvoloshchuk@sfedu.ru.

Автор: Калашникова Татьяна Григорьевна, доцент, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», kalashnikovatg@sfedu.ru.

Author: Timur Efletdinovich Gadzhiev, 2nd year Master’s student, Senior Laboratory Assistant, Southern Federal University, tgadzhiev@sfedu.ru.

Author: Arslan Batyrovich Bovaev, 1st year Master’s student, Southern Federal University, bovaev@sfedu.ru.

Author: Ruslan Yuryevich Pashkovskiy, 1st year Master’s student, Southern Federal University, fleurfeel7@gmail.com.

Author: Yulia Andreyevna Myachina, 3rd year undergraduate student, Southern Federal University, miachina@sfedu.ru.

Author: Shusharina Maria Arkadyevna, 3rd year undergraduate student, Southern Federal University, shusharina@sfedu.ru.

Author: Vadim Igorevich Voloshchuk, 1st year Master’s student, Southern Federal University, vvoloshchuk@sfedu.ru.

Author: Tatyana Grigoryevna Kalashnikova, Associate Professor, Southern Federal University, kalashnikovatg@sfedu.ru.

УДК [004.032]

Гушанский Сергей Михайлович
Потапов Виктор Сергеевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КВАНТОВОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С УЧИТЕЛЕМ

Аннотация

В статье рассматривается разработка и исследование квантовой нейронной сети (КНС) с учителем, предназначенной для решения задач сжатия и восстановления изображений. Предложенный подход сочетает методы квантовых вычислений с принципами нейросетевого моделирования, что позволяет эффективно использовать свойства квантового параллелизма, суперпозиции и запутанности. Представлена математическая модель квантового нейрона и описан процесс обучения с применением метода Видроу–Хоффа, адаптированного к квантовой архитектуре. Для реализации и тестирования модели использованы квантовые библиотеки Qiskit и Pennylane. Экспериментальные результаты демонстрируют потенциал предложенного подхода в обеспечении высокой степени сжатия изображений без значительной потери качества, а также высокой точности восстановления. Работа подтверждает перспективность применения квантовых нейросетей в области интеллектуальной обработки визуальной информации.

Ключевые слова: *квантовая нейросеть; квантовый алгоритм; кубит; модель квантового вычислителя; квантовое запутывание; суперпозиция; квантовый параллелизм*.

Gushansky Sergey Mikhailovich
Potapov Viktor Sergeevich

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF A SUPERVISED QUANTUM NEURAL NETWORK

Abstract

The article presents the development and study of a supervised quantum neural network (QNN) designed for image compression and reconstruction tasks. The proposed approach combines quantum computing techniques with neural network principles, leveraging the advantages of quantum parallelism, superposition, and entanglement. A mathematical model of a quantum neuron is introduced, and the learning process is described using an adaptation of the Widrow–Hoff rule for the quantum architecture. The implementation and testing of the model were carried out using modern quantum libraries such as Qiskit and Pennylane. Experimental results show that the proposed QNN approach achieves a high degree of image compression without significant quality loss, as well as accurate image reconstruction. The

findings confirm the promising potential of quantum neural networks in the field of intelligent visual information processing.

Keywords: *quantum neural network; quantum algorithm; qubit; quantum computer model; quantum entanglement; superposition; quantum parallelism.*

Введение

Эффективность от использования нейронных сетей [1] достигается за счёт параллельной распределенной обработки. Квантовые системы характеризуются наличием мощного квантового параллелизма, который выражается с помощью принципа суперпозиции. Обычной квантовой нейросети присущи те свойства, с помощью которых происходит облегчение процесса ее моделирования за счёт использования законов квантовой физики. Квантовые алгоритмы [2] следует использовать всегда, когда существует такая возможность. Вес каждого нейрона квантовой нейросети может быть измерен, что способствует моделированию квантовых нейросетей за оптимальное время.

Процесс работы квантовой нейросети строится по аналогии с классической нейросетью. Как известно, классическая ИНС [3] состоит из нескольких слоев перцептронов, а именно связанных между собой входного слоя, одного или нескольких скрытых слоев, а также выходного слоя. На каждом скрытом слое происходит вычисление взвешенной суммы выходов предыдущего слоя. При этом, если значение полученной суммы превышает пороговое значение, то происходит переход узла на уровень выше. Функционирование выходного слоя происходит по аналогии со скрытыми слоями, однако показатель точности не проверяется. Главный принцип работы квантового нейрона заключается в следующем: квантовый нейрон получает входные сигналы через несколько входных каналов, а каждый входной сигнал протекает через соединение, которое характеризуется наличием веса, который соответствует синаптической активности нейрона. Каждому нейрону [4] соответствует некоторое пороговое значение. Осуществляется нахождение взвешенной суммы входов с последующим вычитанием из нее порогового значения, результатом чего формируется величина активации нейрона. Сигнал активации преобразуется с помощью функции активации и в результате получается выходной сигнал нейрона, представленный на рисунке 1.

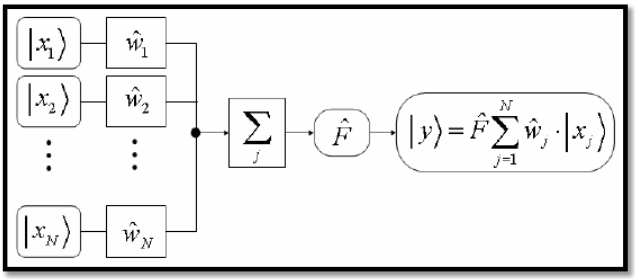


Рис. 1 Математическая модель квантового нейрона

Математическая модель квантового нейрона $|y\rangle = \hat{F}\sum_{j=1}^{N}\widehat{w_j}\cdot|x_j\rangle$, где $\widehat{w_j}$ – это матрицы 2×2, действующие на основе $\{|0\rangle,|1\rangle\}$; $\hat{F}$ – оператор, который может осуществлять работу сети квантовых ячеек. Для функционирования КНС необходимо использовать заранее подготовленную обучающую выборку. В таком случае КНС имеет два входных параметра. При этом все обучающие примеры n имеют два входных регистра: от $|\alpha\rangle_{11}$ до $|\alpha\rangle_{n2}$. Формируемые ответы хранятся в регистрах [5]: от $|\Omega\rangle_{11}$ до $|\Omega\rangle_{n2}$. Каждый выходной узел имеет вес $|\psi\rangle_i$. После того, как выполнено классифицирование обучающего примера, регистры $|\psi\rangle_1$ и $|\psi\rangle_2$ отражают способность сети классифицировать его. Для измерения производительности происходит увеличение $|p\rangle$ на сумму всех $|\varphi\rangle_j$. После того, как все обучающие примеры классифицированы, параметр $|p\rangle$ будет представлять собой сумму выходных узлов с правильными ответами. При этом значения будут лежать в интервале от нуля до произведения количества обучающих примеров на количество выходных узлов. Главная особенность заключается в том, что $|\psi\rangle$ описывается как суперпозиция всех возможных весовых векторов с корректной классификацией обучающих примеров.

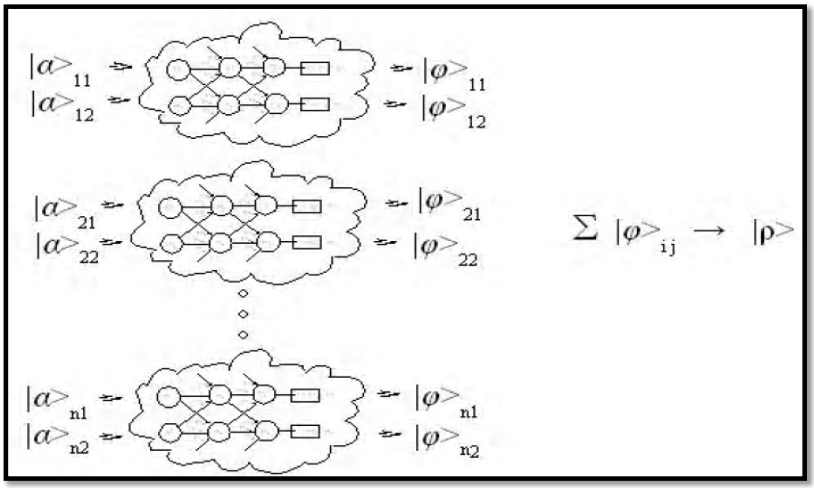


Рис. 2 Процесс обучения КНС

Остальные регистры $(\beta\rangle,|\varphi\rangle,|p\rangle)$ инициализируются в состояние $|0\rangle$. Затем происходит классификация каждого примера из обучающей выборки с обновлением регистра производительности. Благодаря суперпозиции процесс классифицирования обучающего примера осуществляется с учетом каждого возможного весового вектора одновременно. Каждый весовой вектор запутан с $|p\rangle$ таким образом, что $|p\rangle$ согласовывается с тем, как успешно каждый весовой вектор классифицирует все обучающие данные. В таком случае$|p\rangle = n \times m$.

1. Разработка квантовой нейронной сети с учителем

Ключевым элементом функционирования нейросетей, как классических, так и квантовых, является процесс обучения. Различают обучение с учителем и обучение путем самоорганизации. В основе обучения с учителем лежит намеренное сопоставление каждому входному вектору из обучающей выборки желаемого вектора результата. При этом производится настройка весов сети – последовательность действий, направленная на то, чтобы при каждом предъявлении сети вектора из обучающей выборки выходной вектор был максимально близок к вектору желаемого результата. В известных моделях КНС процедура настройки сети состоит из последовательности классических операций измерения и подготовки состояний. Использование фазы сигнала в нейросетевых моделях является математической находкой и связано с обобщением метода обратного распространения ошибки, используемого для обучения обычного классического перцептрона, на нейронные сети с комплексными весовыми коэффициентами. В отсутствие взаимодействия с окружением отличие квантовой модели нейрона от классической состоит в отсутствии нелинейной сигмоидной функции [6] на выходе нейрона – в силу линейности квантовой механики линейная суперпозиция входных сигналов может быть подвергнута лишь линейному преобразованию:

$$|u_k\rangle = \sum_{j=1}^{N} \widehat{w}_{kj} \left|x_j\right\rangle, |y_k\rangle = \hat{F}|u_k\rangle. \quad (1)$$

Появление конкретного выходного состояния связано не только с унитарной эволюцией внутри сети, но и с актом измерения, в результате которого происходит редукция квантовой суперпозиции состояний к одному конкретному состоянию. В общем случае следует также принять во внимание неконтролируемое взаимодействие сети с флуктуирующим окружением. Без процессов приготовления/измерения состояний и процесса воздействия окружения на весовые множители нарушение унитарности в квантовой сети с учителем невозможно. Пусть фиксирован нейрон с номером k = 1. Предположим также, что отсутствует модификация выходного сигнала: $\hat{F} = \hat{1}$. Тогда при подаче на n входов нейрона вектора $\{\left|x_j\right\rangle\} 0 < j \leq n$, состоящего из n квантовых состояний, на выходе нейрона в дискретный момент времени t формируется состояние:

$$|y(t)\rangle = \sum_{j=1}^{n} \widehat{w}_j \left|x_j\right\rangle. \quad (2)$$

По аналогии с классическим перцептроном используем для обучения квантового нейрона сигнал ошибки:

$$|e(t)\rangle = |d\rangle - |y(t)\rangle, \quad (3)$$

где $|d\rangle$ – желаемое выходное состояние для входного вектора $\{\left|x_j\right\rangle\} 0 < j \leq n$. Тогда изменение весов к следующей $(t+1)$ эпохе обучения, согласно правилу Видроу-Хоффа, составит:

$$\widehat{w}_j(t+1) = \widehat{w}_j(t) + \mu(|d\rangle - |y(t)\rangle)\left|x_j\right\rangle. \quad (4)$$

Входящие состояния предполагаются нормированными $\left\langle \mathrm{x_j} \middle| \mathrm{x_j} \right\rangle = 1$. Таким образом, процесс обучения квантового нейрона, представленный в формуле (1),

как и его классического прототипа, сводится к следующей последовательности операций:

1) задается обучающая выборка из M векторов, т. е. набор, состоящий из векторов $(|x_1^j\rangle, \dots, |x_n^j\rangle)$, и соответствующее ему состояние желаемого результата $|d^j\rangle, j = \overline{1, M}$;

2) случайным образом генерируются матрицы весов $\widehat{w}_k$;

3) проводится цикл обучения:

```
for j = 1 to M do
    for t = 0 to Tmax do
        получение выходного состояния
        y(t) = F sum_k w_k(t) | x_k >
        вычисление ошибки для каждого из векторов обучающей
        выборки
        |e(t)> = |y(t)> - |d>
        коррекция весов
        w_k(t+1) = w_k(t) + eta * |e(t)><x_k|
    end do;
    переход к следующему вектору обучающей выборки
end do;
```

Заключение

В данной работе был разработан квантовый алгоритм, основанный на классических методах сжатия и восстановления изображений, при этом в качестве носителей информации использовались квантовые состояния. Сжатие и реконструкция изображений осуществлялись с помощью специально построенной квантовой нейронной сети. Восстановленные квантовые состояния декодировались в классическое представление, что завершало процесс обработки изображения. Результаты моделирования подтвердили эффективность и преимущество предложенного квантового подхода по сравнению с традиционными методами. Несмотря на то, что реализованная квантовая сеть с фиксированным параметром α = 0 обладает определёнными ограничениями и применима только к базовым задачам, она создаёт основу для дальнейших исследований. В перспективе предполагается сохранение фазового параметра α в квантовых вентилях и построение более сложных квантовых сетей, способных решать широкий спектр задач, в том числе сжатие и восстановление неизвестных квантовых состояний. С развитием квантовых технологий ожидается расширение областей их применения, включая квантовое зрение и интеллектуальную обработку визуальной информации. Предложенный алгоритм на базе квантовой нейросети также может быть использован в задачах общей квантовой визуализации посредством проектирования оптических квантовых схем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. N. C. Jones, J. D. Whitfield, P. L. McMahon, M.-H. Yung, R. V. Meter, A. Aspuru-Guzik, and Y. Yamamoto, Faster quantum chemistry simulation on fault-tolerant quantum computers, New Journal of Physics 14, 115023 (2012);
2. P. W. Shor, Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer, SIAM J. Comput. 26, 1484.1509 (1997);
3. A. W. Harrow, A. Hassidim, and S. Lloyd, Quantum algorithm for linear systems of equations, Phys. Rev. Lett. 103, 150502 (2009);
4. P. W. Shor, Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory, Phys. Rev. A 52, R2493 (1995);
5. D. Gottesman, Stabilizer codes and quantum error correction (California Institute of Technology, 1997);
6. Bernstein, E., Vazirani U. Quantum complexity theory. In Proceedings of the 25th ACM Symposium on the Theory of Computing, pages 11 – 20, 1993;

Автор: Гушанский Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, переулок Некрасовский, 44, 347900, телефон: +7(8634) 37-16-56, e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru.

Author: Gushanskiy Sergey, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Southern Federal University, 347900, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovskyi street, phone: +7(8634) 37-16-56, e-mail: smgushanskiy@sfedu.ru.

Автор: Потапов Виктор Сергеевич., старший преподаватель кафедры вычислительной техники Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, переулок Некрасовский, 44, 347900, телефон: +7(8634) 37-16-56, e-mail: vpotapov@sfedu.ru.

Author: Potapov Viktor Sergeevich, Senior Lecturer, Department of Computer Engineering, Southern Federal University, 347900, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovskyi street, phone: +7(8634) 37-16-56, e-mail: vpotapov@sfedu.ru.

УДК 621.317.799:681.326.3

Леонова Антонина Валерьевна, Синютин Сергей Алексеевич

ОТЛАДКА МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫХ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА GNU-RADIO

Рассмотрена технология отладки микроконтроллерных систем обработки сигналов с использованием GNU Radio. Представлен пример обработки данных с инерциального датчика MPU6050 (ESP32) для детектирования движения. Показаны этапы фильтрации и визуализации данных.

Микроконтроллер, акселерометр, ЦОС, GNU Radio, обработка сигналов, фильтрация, отладка, автоматизация.

Leonova Antonina Valeryevna, Sinyutin Sergey Alekseevich

DEBUGGING MICROCONTROLLER SIGNAL PROCESSING SYSTEMS USING GNU- RADIO

A technology for debugging microcontroller-based signal processing systems using GNU Radio is considered. An example of processing data from an MPU6050 inertial sensor (ESP32) for motion detection is presented. Steps of filtering and data visualization are shown.

Microcontroller, accelerometer, DSP, GNU Radio, signal processing, bird behavior, monitoring, debugging, filteringб automation.

Рассмотрим современную технологию для построения и отладки аппаратно-программных комплексов на базе микроконтроллера с большой долей задач по цифровой обработке сигналов (ЦОС). ПО современных микроконтроллеров обычно включает большое количество библиотек ЦОС, позволяющих реализовать базовые алгоритмы (преобразование Фурье, цифровую фильтрацию и т.п.). Однако подготовка параметров для этих библиотечных процедур, а также согласование типов данных и потоков данных само по себе являются уже достаточно сложной задачей.

Еще более сложная проблема – визуализация результатов ЦОС. Зачастую микроконтроллер вообще не имеет аппаратных средств для такого отображения. А во время отладки нужно иметь возможность оперативно просматривать сигнал в различных точках алгоритма, причем как во временной, так и в частотной области.

Кроме того, потоки данных даже в рамках одного алгоритма могут быть разного типа (комплексные, с плавающей запятой, целые 32 бита, целые 16 бит,

байты). Система визуализации результатов работы ЦОС должна эффективно работать с любыми типами данных.

В результате анализа многих пакетов ЦОС, таких как Matlab, SimInTech, LabView [1-4] выбор был сделан в пользу GNU Radio.

GNU Radio – среда визуального проектирования систем ЦОС, ориентированная на потоковые алгоритмы [5-6]. Фактически – это автоматический генератор программы ЦОС на языке Python. В состав GNU Radio входит графический редактор и библиотека блоков, каждый из которых может быть соединен с другими. Содержимое блока скрыто (хотя его можно просмотреть – система открытая и бесплатная). Входы и выходы блока имеют цветовую маркировку, соответствующую различным типам данных, например, комплексные – синий, плавающая запятая – оранжевый и т.п. Есть блоки-источники сигнала (как программно- генерируемые, так и связанные с реальной аппаратурой, например с SDR трансиверами). Существуют и блоки-приемники сигнала, также программные и связанные с аппаратными средствами. Ну, и конечно существует большое количество блоков обработки и визуализации сигналов.

Для примера рассмотрим конкретную задачу: имеется аппаратно-программный комплекс на базе микроконтроллера ESP32, записывающий данные с частотой дискретизации 400 Гц от 6-ти осевого инерциального датчика MPU6050, в файл на SD карте [7-10]. На рис.1 показан макет и полученный сигнал в результате экспериментальных испытаний, которые заключались в фиксации перемещений, прыжков, скачков птицы в клетке.

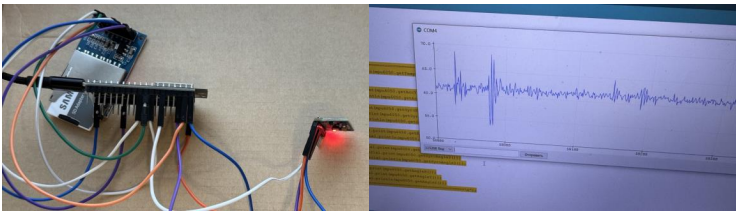


Рис.1 Макет и испытания

Файл считывается в персональном компьютере с помощью блока GNU Radio «File Source». В файле последовательно записаны группы по 6 16-ти битных целых чисел, соответствующих 3 каналам акселерометров и 3 каналам датчиков угловых скоростей (МЭМС гироскопов). В GNU Radio алгоритмы ЦОС проще производить в формате с плавающей запятой, поэтому единый поток данных из файла нужно преобразовать в 6 параллельных потоков (по одному на каждый акселерометр и по одному на каждый гироскоп) и формат данных каждого канала изменить на данные с плавающей запятой. Для проверки подключим многоканальное средство визуализации –«QT GUI Time Sink». Соответствующий граф показан на рисунке 2, а результат его работы – на рисунке 2.

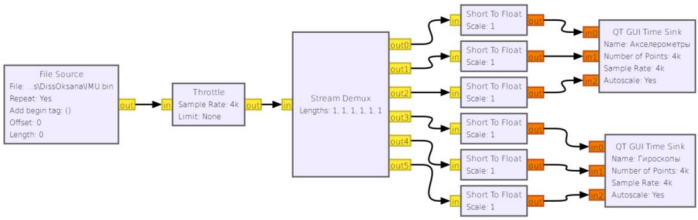


Рис 2. Проверка записанных сигналов (граф в GNUradio)

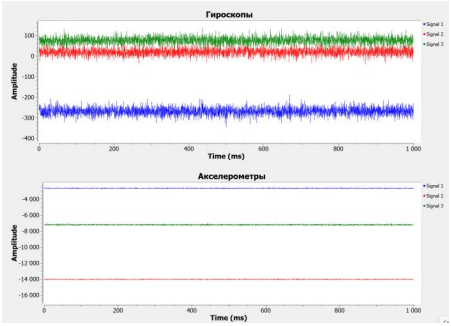


Рис. 3 Сигналы, записанные на SD карте

На рис. 3 видно, что сигналы акселерометра имеют значительную постоянную составляющую, которая для поиска движения не нужна. Ее можно отфильтровать с помощью фильтра высоких частот (ФВЧ). Граф с такой фильтрацией показан на рисунке 4, а результат его работы – на рисунке 5.

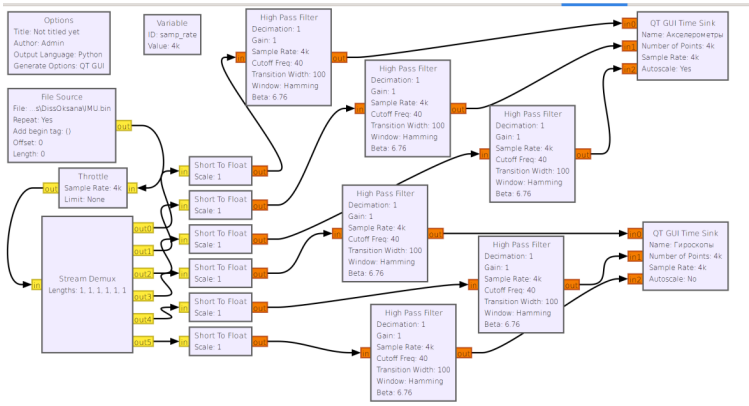


Рис. 4 ВЧ фильтрация сигналов (граф в GNUradio) для удаления постоянной составляющей

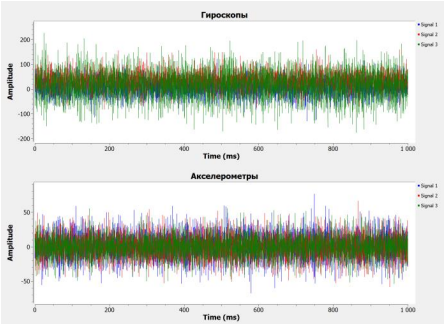


Рис. 5 Результат фильтрации

Видно, что сигналы как гироскопов, так и акселерометров освободились от постоянной составляющей и пригодны для дальнейшей обработки.

Тестовые записи показали, что придвижении птицы в клетке основная информация приходит от акселерометров, поэтому далее для детектирования движения будем использовать информацию только от них. Самый простой детектор, предполагающий одинаковый вклад от каждого акселерометра в сигнал движения- анализ суммы модулей сигналов от 3-х акселерометров с последующей низкочастотной фильтрацией. На рисунке 6 показан соответствующий граф, а на рисунке 7 – результат его работы.

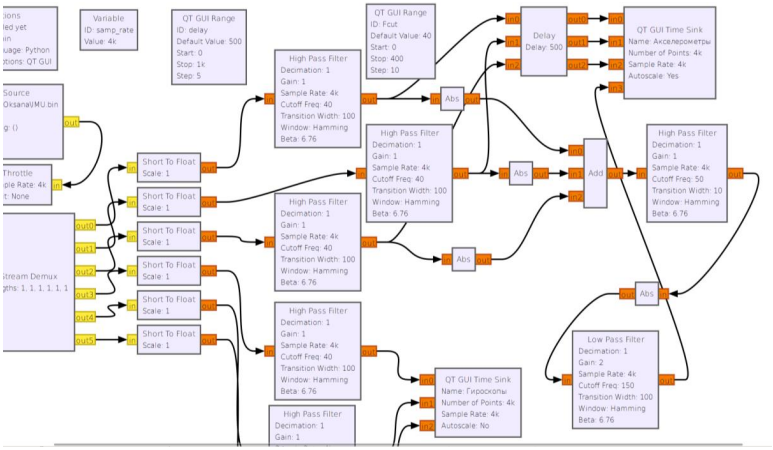


Рис. 6 Селектор сигналов движения (граф в GNUradio)

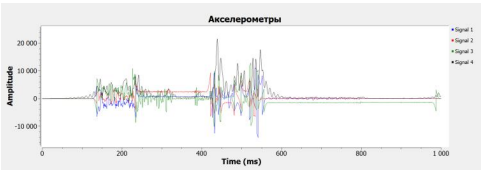


Рис. 7 результат работы селектора движения

Для четкой селекции фактов движения желательно иметь некий порог, ниже которого детектор не генерирует сигнал обнаружения. Это можно сделать, используя блок сравнения с порогом, как показано на рисунке 8. Результат работы селектора показан на рисунке 8. Signal 5 – результат работы порогового алгоритма. Четко виден всплеск выше 50000 при фиксации паттерна движения.

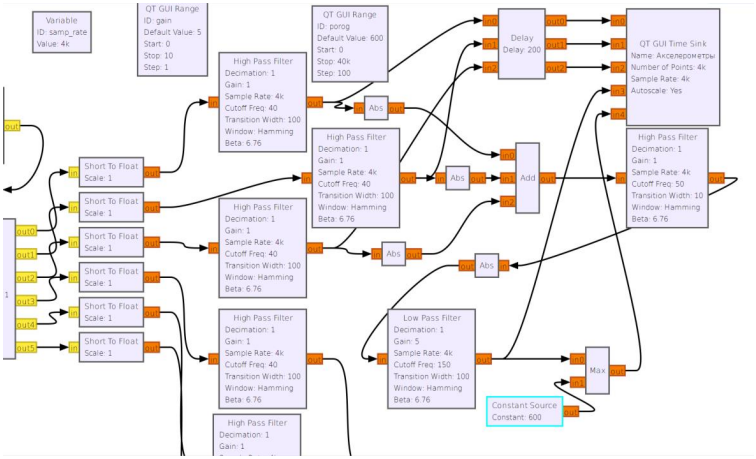


Рис. 8 Селектор движения (граф в GNUradio) с заданием порога обнаружения

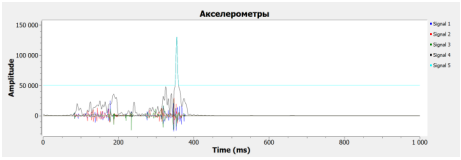


Рис. 9 Результат работы селектора движения с заданием порога обнаружения

Вывод

В заключение можно отметить, что применене технологии GNU Radio позволило быстро произвести масштабирование алгоритма поиска движения, с

тонкой настройкой частот среза фильтров и управления порогом обнаружения. Возможность визуального моделирования и анализа сигналов в GNU Radio значительно упрощает процесс оптимизации алгоритма и достижения наилучших результатов в реальных условиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Витязев В.В., Волченков В.А., Овинников А.А., Лихобабин Е.А. Цифровая обработка сигналов. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2023. – 188с.
2. Витязев В.В. Цифровая частотная селекция сигналов. – М.: Радио и связь, 1993. 240 с.
3. Рабинер Л., Гоулд.Б. Теория применения цифровой обработки сигналов. – М: Мир, 1978. 848 с.
4. Оппергейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов. – М: Связь, 1979. 416 с.
5. GnuRadio: Урок 1, Signal Source, Audio source, фильтры [Электронный ресурс]. – URL: https://my-gnuradio.org/2014/11/09/ispolzovanie-gnu-radio-companion-urok-1/?ysclid=mclx3mpdnd827659732 (дата обращения: 20.05.2025).
6. Радио конструктор обработки цифровых сигналов [Электронный ресурс]. – URL: https://techstop-ekb.ru/linux/sdr-gnu-radio-3.htm (дата обращения: 20.05.2025).
7. Синютин С.А., Леонова А.В. Разработка киберфизических систем на основе микроконтроллеров. – РнД.: ЮФУ, 2014.
8. А.В., Петров И.А. Основы микропроцессорных систем управления. – М.: НТЛ, 2016.
9. Богданов В.А. Системы автоматического управления. – М.: Высшая школа, 2005.
10. Курносов Д.И., Литвинов В.П. Программирование микроконтроллеров на языке С++. – М.: БХВ-Петербург, 2014.

Автор: Синютин Сергей Алексеевич, зав.кафедрой ВИРС ИРТСУ Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Энгельса, д.1, 347900, телефон: +79281579965, email: sasinyutin@sfedu.ru.

Автор: Леонова Антонина Валерьевна, доцент ИРТСУ Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Энгельса, д.1, 347900, телефон: +79043467991, email: leonova@sfedu.ru.

Author: Sinyutin Sergey Alekseevich, Head of the Department VIRS, Institute of Radio Engineering Systems and Control, SFEDU, Russia, 347900, Taganrog, Engels Street, 1. Phone: +79281579965, email: sasinyutin@sfedu.ru.

Author: Antonina Leonova, Associate Professor, Institute of Radio Engineering Systems and Control, SFEDU, Russia, 347900, Taganrog, Engels Street, 1. Phone: +79043467991, email: leonova@sfedu.ru.

УДК 004.021

Никитин Евгений Павлович, Калюжная Софья Евгеньевна, Кряжев Артём Иванович, Зубанев Родион Сергеевич, Галова Мария Константиновна

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА МУРАВЬИНОЙ КОЛОНИИ НА НЕПОЛНЫХ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ГРАФАХ

Целью работы является качественная и количественная оценка работы алгоритма муравьиной колонии в задаче поиска цикла Гамильтона на орграфе с неполным набором дуг. Для этого предлагаемая задача была сформулирована математически, спроектирована компьютерная симуляция на языке Python и введен математический аппарат для описания эффективности алгоритма. Результаты показали, что при решении такой проблемы алгоритм перестаёт сходиться, а также с каждым новым шагом найденное решение становится всё менее и менее эффективным, пока не доходит до своего максимума. В статье приводятся первичные данные, необходимые для дальнейшего решения найденных отклонений.

Ключевые слова: алгоритм муравьиной колонии, оценка эффективности, задача коммивояжера, неполный ориентированный граф

Nikitin Evgeny Pavlovich, Kalyuzhnaya Sofia Evgenyevna, Kryazhev Artem Ivanovich, Zubanev Rodion Sergeevich, Galova Maria Konstantinovna

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF THE ANT COLONY ALGORITHM ON INCOMPLETE DIRECTED GRAPHS

The aim of this work is to qualitatively and quantitatively evaluate the performance of the ant colony algorithm in the Hamilton cycle search problem on a digraph with an incomplete set of arcs. To do this, the proposed problem was formulated mathematically, a computer simulation was designed in Python, and a mathematical apparatus was introduced to describe the effectiveness of the algorithm. The results showed that when solving such a problem, the algorithm stops converging, and with each new step, the solution found becomes less and less effective until it reaches its maximum. The article provides the primary data necessary for further resolution of the found deviations.

Keywords: ant colony algorithm, efficiency evaluation, traveling salesman problem, incomplete directed graph

Введение

Объектом исследования в данной работе является та часть теории алгоритмов, которая, в последнее время, все чаще используется для решения практических задач оптимизации и поиска путей – эвристические алгоритмы.

На сегодняшний день, когда эвристический подход уже достаточно часто практикуется в решении некоторых алгоритмических задач, главной особенностью таких алгоритмов по-прежнему остаётся их способность

находить решения, близкие к наилучшему в условиях ограниченных ресурсов и времени [1, 2]. Также, отличительной чертой выделяют высокую адаптивность в условиях динамически изменяющихся задач [2].

Открытым остается вопрос, как будут вести себя подобные алгоритмы в классических задачах, но с наличием дополнительных математических условий. Часто, настоящие практические проблемы, решаемые с помощью эвристических методов, остаются хоть и похожими на типовые, но всё же превосходят их по своей сложности одним лишь фактом наличия дополнительных условий. Например, муравьиный алгоритм, в применении к классической задаче коммивояжёра, не учитывает возможную неполноту исследуемого графа. Существуют исследования на тему оптимизации алгоритма с применением генетической модификации, но задачи, рассматриваемые в них, относятся к классическим проблемам оптимизации и планирования [3, 4, 5, 6, 7].

Таким образом, целью данной работы является получение качественной и количественной оценки поведения алгоритма муравьиной колонии на произвольных взвешенных неполных ориентированных графах (далее просто – орграфы) с набором необходимых для посещения. При этом, такой тип задач и полученные результаты будут иметь реальную практическую значимость.

Математическое описание задачи

Математически, алгоритм муравьиной колонии описывается наличием трёх матриц $\mathbf{P_{n\times n}}$, $\mathbf{T_{n\times n}}$ и $\mathbf{R_{n\times n}}$ – матрица вероятностей перехода элементов $p_{i,j}$, матрица феромонов элементов $\tau_{i,j}$ и матрица весов (длин) элементов $r_{i,j}$ соответственно [8]. Элементы матриц определяются как (выражения 1):

$$p_{i,j} = \frac{\left(\tau_{i,j}^{\alpha}\right)\left(\frac{1}{r_{i,j}}\right)^{\beta}}{\sum\left(\tau_{i,j}^{\alpha}\right)\left(\frac{1}{r_{i,j}}\right)^{\beta}}, \qquad \tau_{i,j} = (1-\rho)\tau_{i,j} + \Delta\tau_{i,j}, \qquad \Delta\tau_{i,j} = \frac{q}{r_{i,j}} \qquad (1)$$

Рассмотрим орграф $G = (E, V)$ с количеством вершин $|V| = n$ и определённой матрицей смежности $\mathbf{R_{n\times n}}$. В таком графе отсутствуют петли, а также с ним связана матрица $\mathbf{Q_{n\times n}}$, обозначающая недоступные рёбра. Введём плотность графа $D = \frac{E_{\text{ор}}}{E_{\text{полн}}}$. Соответственно, матрица $\mathbf{Q}$ будет уменьшать плотность графа G в D раз.

В данной задаче эффективность алгоритма будет описываться функцией абсолютных затрат $\mathrm{g}(k) = g_k$, где g_k является количеством повторяющихся проходов одних и тех же дуг орграфа на каждой итерации k, и функцией относительной расходимости, которая, для простоты, будет определена как $f(k) = \frac{\sigma_k}{\sigma_{k-1}}$, где σ_k – показатель абсолютной ценности k-ой итерации (выражение 2):

$$\sigma_k = \sum \Delta\tau_{i,j}^k, \tag{2}$$

где $\Delta\tau_{i,j}^k$ – вклад феромона из i в j вершину на итерации k.

Определим гиперпараметры как $\alpha = 1.5, \beta = 1.2, \rho = 0.6, q = 10$.

Условия эксперимента

Рассмотрим классическую задачу коммивояжёра. Условимся, что наличие ограничений в виде матрицы $\boldsymbol{Q_{n\times n}}$, должно означать следующее: в отличие от классической задачи коммивояжёра, в данной задаче итерации обхода графа алгоритма муравьиной колонии могут посещать те вершины, в которых они уже были. Это заключение напрямую следует из простого мысленного эксперимента: *если ограничения случайны, значит существует орграф, в котором ситуация, при которой необходимо совершить петлю при поиске полного маршрута, может возникнуть на любой из итераций цикла и предсказать это вычислительно невозможно*.

Тогда, чтобы уменьшить резко возрастающее число возможных маршрутов и сохранить чистоту эксперимента, введём следующие неизменяемые условия для симуляции:

- если в текущей i строке матрицы вероятностей $\mathbf{P_{n\times n}}$ сумма всех элементов p_i равна 0, то итерация попала в тупик и производится выход из цикла;
- итерации обладают памятью и помнят предыдущую вершину. вероятность перехода из текущей вершины в предыдущую $p_{i,j}$ равна 0;
- общее количество посещённых вершин не должно превышать $2n$, чтобы избежать бесконечного выполнения программы.

Далее, сгенерируем задачу для $n = 20, 35, 50$ вершин на двумерном полотне, а расстояния $r_{i,j}$ между ними запишем в матрицу:

$$\mathbf{R_{n\times n}} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & r_{n-1,0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{0,n-1} & \cdots & 0 \end{pmatrix},$$

Затем, сгенерируем матрицу $\mathbf{Q_{n\times n}}$, каждый элемент которой с вероятностью $p_0 = 0.3$ равен 0, все остальные единицы. Далее, выполним поэлементное умножение матриц:

$$\mathbf{R`_{n\times n}} = \mathbf{R_{n\times n}} \odot \mathbf{Q_{n\times n}}, \tag{3}$$

где $\mathbf{R`_{n\times n}}$ – изменённая матрица смежности.

Результаты эксперимента

Учитывая сильный стохастический характер системы, для обеспечения корректности получаемых данных, выполним измерения работы каждого

алгоритма (в классической задаче и в задаче с ограничениями) по 250 раз, а полученные данные усредним. Получим оценки $\overline{f_1(k)}, \overline{f_2(k)}, \overline{g(k)}$ для $n = 20, 35, 50$. Количество муравьев (внутренний цикл) установим, как n, а количество итераций обновления карты феромона (внешний цикл) - $3n$, для получения более яркой картины поведения алгоритма. Эксперимент проводился в специально подготовленной симуляции на языке Python. Графически, результаты эксперимента представлены на рисунке 1.

Условимся, что при 250-ти повторений эксперимента $D \to 1 - p_0 = 0.7$.

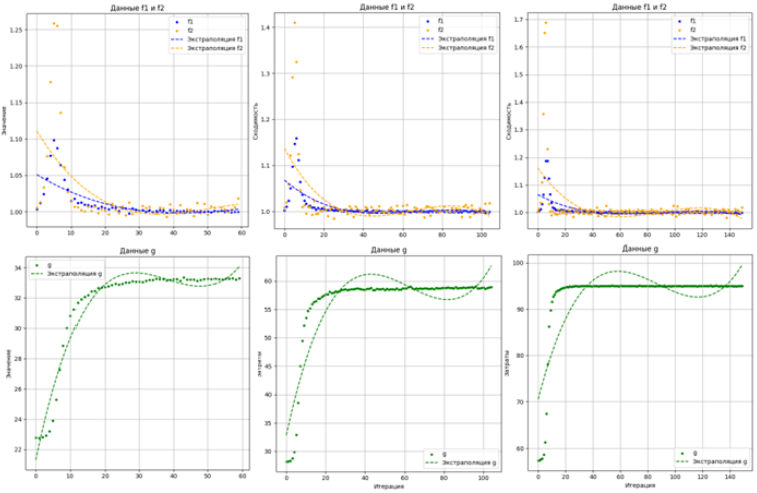


Рис. 1 Результаты эксперимента для значений $\overline{f_1(k)}, \overline{f_2(k)}, \overline{g(k)}$ *для* $D = 0.3, n = 20, 35, 50$ *при 250-ти измерений*

Выводы

В данной работе с помощью компьютерной симуляции на языке Python были получены усреднённые по 250-ти измерениям зависимости $\overline{f_1(k)}, \overline{f_2(k)}, \overline{g(k)}$ для количества вершин графа $n = 20, 35, 50$. Вершины располагались в случайном порядке, также как и недоступные дуги.

Для представления численного описания наблюдаемых из рисунка 1 отклонения в поведении алгоритма на задаче с неполным орграфом, рассмотрим производные дискретных функций $\overline{f_1(k)}$ и $\overline{f_2(k)}$ при $n = 50$:

$$f`(k) = \frac{(3 \cdot f(k) - 4 \cdot f(k-1) + f(k-2))}{2h},$$

где шаг $h = 1$.

Из рисунка 2 становится очевидно, что алгоритм сходится при значении производной $f`(k) = 0$. Для $\overline{f_1(k)}$ это происходит почти всегда на $k = 10$

итерации. Можно также заметить, что на этой же итерации для случая $\bar{f}_2(k)$ возникает некоторая сингулярность, вследствие которой функция затрат $\bar{g}(k)$ стремительно достигает своего максимума и алгоритм замыкается сам в себе, переставая искать цикл Гамильтона. Вместо этого, было установлено, что алгоритм совершает проход за проходом в локальных циклах, оставляя всё больше феромона на них.

Из рисунка 2 также видно, что $\bar{f}_2(\bar{k})$ совершает случайные осцилляции в районе $\bar{f}_2(\bar{k}) = 1$. Это напрямую означает, что соседние итерации алгоритма различаются между собой, следовательно, на неполном орграфе алгоритм муравьиной колонии не может сойтись. Дополнительно, было выявлено, что для числа итераций $k = 250$ разность $\Delta\bar{f}_1(\bar{k}) = |\bar{f}_1(\bar{k+1}) - \bar{f}_1(\bar{k+1})|$ не имеет тенденции стремиться к 0. Максимальные и минимальные разности оказались равными:

$$\Delta\bar{f}_1(\bar{k})_{max} = 0.126, \qquad \Delta\bar{f}_1(\bar{k})_{min} = 0.714 \cdot 10^{-6}$$

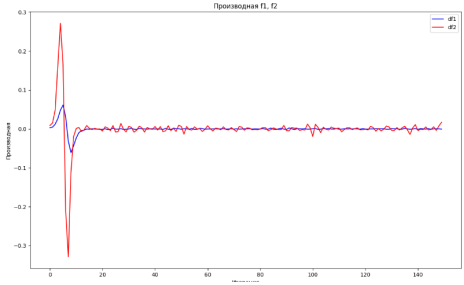


Рис. 2 График первой производной функций $\bar{f}_1(\bar{k})$ *и* $\bar{f}_2(\bar{k})$ *для* $D = 0.3, n = 50$ *при 250-ти измерений*

Подводя итоги, определим выявленную проблему, как тенденция алгоритма муравьиного алгоритма на неполном графе выбирать в качестве оптимального маршрута локальные циклы, а не требуемый цикл Гамильтона. Потенциальным решением является фундаментальное видоизменение алгоритма. На данный момент проблема является актуальной для задач робототехники, оптимизации и машинного обучения, т.к. в этих областях часто используют методы эвристики [9, 10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Takeshi Kano. Review of Interdisciplinary Approach – Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, 2023.

2. H. L. Kwa, J. L. Kit, Nikolaj Horsevad, J. Philippot, Mohammadzaman Savari, Roland Bouffanais. Adaptivity: a path towards general swarm intelligence? – Frontiers in Robotics and AI, 2023.

3. E. Blagoveshchenskaya, I. Mikulik, L. Strüngmann. Ant colony optimization with parameter update using a genetic algorithm for travelling salesman problem – Petersburg State Transport University, 2021.

4. Xiaojun Liu, Hong Yi, Z. Ni. Application of ant colony optimization algorithm in process planning optimization – Journal of Intelligent Manufacturing, 2010.

5. U. Janjarassuk. Hybrid Ant Colony Optimization Method for the Traveling Salesman Problem – 2024 9th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR), 2024.

6. Yu Sheng. Computational optimization research on ant colony optimization for the traveling salesman problem – Journal of Physics: Conference Series, 2022.

7. Sarin Thong-ia, P. Champrasert. Gene-Ants: Ant Colony Optimization with Genetic Algorithm for Traveling Salesman Problem Solving – 2023 International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers, and Communications (ITC-CSCC), 2023.

8. Матренин П.В., Секаев В.Г. Системное описание алгоритмов роевого интеллекта, 2013. Программная инженерия. 39-45.

9. H. Yahia, A. Mohammed. Path planning optimization in unmanned aerial vehicles using meta-heuristic algorithms: a systematic review – Environmental Monitoring & Assessment, 2022.

10. Pollyanna G. Faria Dias, Mateus C. Silva, G. P. R. Filho, P. A. Vargas, L. P. Cota, G. Pessin. Swarm Robotics: A Perspective on the Latest Reviewed Concepts and Applications – Italian National Conference on Sensors, 2021.

Автор: Никитин Евгений Павлович, студент кафедры радиофизики и нанотехнологий физико-технического факультета Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040, телефон: +7 (9649) 44-56-61, e-mail: mr.keep09@yandex.ru

Author: Nikitin Evgeny Pavlovich, student of the Department of Radiophysics and Nanotechnology of the Physics and Technology Faculty of the Kuban State University, Russia, Krasnodar, 149 Stavropolskaya street, 350040, phone: +7 (9649) 44-56-61, email: mr.keep09@yandex.ru

Автор: Калюжная Софья Евгеньевна, студент кафедры радиофизики и нанотехнологий физико-технического факультета Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040, телефон: +7 (9676) 74-75-15, e-mail: kaliuzhnaya.sophia.evgenevna@gmail.com

Author: Kaliuzhnaya Sophia Evgenevna, student of the Department of Radiophysics and Nanotechnology of the Physics and Technology Faculty of the Kuban State University, Russia, Krasnodar, 149 Stavropolskaya street, 350040, phone: +7 (9676) 74-75-15, email: kaliuzhnaya.sophia.evgenevna@gmail.com

Автор: Кряжев Артем Иванович, студент кафедры теоретической физики и компьютерных технологий физико-технического факультета Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040, телефон: +7 (9826) 15-20-05, e-mail: kryzhevart05@gmail.com
Author: Kryazhev Artem Ivanovich, student of the Departments of Theoretical Physics and Computer Technology of the Physics and Technology Faculty of the Kuban State University, Russia, Krasnodar, 149 Stavropolskaya street, 350040, phone: +7 (9826) 15-20-05, email: kryzhevart05@gmail.com

Автор: Зубанев Родион Сергеевич, студент кафедры оптоэлектроники физико-технического факультета Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040, телефон: +7 (9883) 17-76-31, e-mail: zrodinz100@gmail.com
Author: Zubanev Rodion Sergeevich, student of the Department of Optoelectronics of the Physics and Technology Faculty of the Kuban State University, Russia, Krasnodar, 149 Stavropolskaya street, 350040, phone: +7 (9883) 17-76-31, email: zrodinz100@gmail.com

Автор: Галова Мария Константиновна, студент кафедры радиофизики и нанотехнологий физико-технического факультета Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040, телефон: +7 (9883) 17-76-31, e-mail: galovamaria0410@gmail.com
Author: Galova Maria Konstantinovna, student of the Department of Radiophysics and Nanotechnology of the Physics and Technology Faculty of the Kuban State University, Russia, Krasnodar, 149 Stavropolskaya street, 350040, phone: +7 (9883) 17-76-31, email: galovamaria0410@gmail.com

УДК 004.3,004.4,004.052.32

Зинченко Юрий Евгеньевич, Зинченко Татьяна Анатольевна

РАСПОЗНАВАНИЕ И АДАПТИВНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ТЕСТОВ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

Представляется подход распознавания и тестирования цифровых устройств, который базируется на сочетании традиционного псевдослучайного тестирования на первом этапе с «распознаванием объекта диагностики» и построении «альтернативного графа объекта» с последующим «блужданием» по этому графу. На базе предложенного подхода разработана система AGAT тестирования цифровых устройств. Тестирование может выполняться как для одного, так группы объектов диагностики на одном ПК либо группе ПК в локальной компьютерной сети, при этом учитывается «многопоточность» на основе многоядерных процессоров ПК сети. Выполняются экспериментальные исследования предложенного подхода и системы AGAT на двух типах объектов диагностики: международном наборе экспериментальных схем ISCAS'89 и наборе ТЭЗ специализированного радиотехнического комплекса.
Ключевые слова: цифровое последовательностное устройство, ISCAS'89, ТЭЗ, константная неисправность, псевдослучайное тестирование, граф состояний и переходов, распознавание объекта диагностики

Zinchenko Yuri Evgenievich, Zinchenko Tatyana Anatolyevna

RECOGNITION AND ADAPTIVE GENERATION OF PSEUDO-RANDOM TESTS OF DIGITAL DEVICES

An approach to recognizing and testing digital devices is presented, which is based on a combination of traditional pseudo-random testing at the with "recognition of the DUT" and construction of an alternative graph of the object with subsequent "wandering" along this graph. Based on the proposed approach, a system for recognizing and testing digital devices has been developed. Testing can be performed for one or a group of DUTs on one computer or as part of a local computer network, including taking into account "multithreading" based on multi-core processors of personal computers in the network. Extensive research of the proposed approach and the developed system is carried out on two types of DUTs: ISCAS'89 and a set of PCBs of a specialized radio engineering complex.
Keywords: sequential digital device, ISCAS'89, PCB, stuck-at fault, pseudo-random testing, state and transition graph, recognition of the DUT

Введение

Автоматическая генерация и синтез тестов цифровых устройств (ЦУ) РЭА и ЭВА являются классическими задачами, которые возникли одновременно с рождением вычислительной техники. Однако несмотря на это они до сих пор успешно не решены. Существующие на мировом рынке и стран СНГ системы

автоматического построения тестов обеспечивают покрытие (обнаружение) в среднем всего лишь 50-60% неисправностей, что является далеко недостаточным. Поэтому компании, занимающиеся разработкой диагностического обеспечения, вынуждены строить или достраивать тесты вручную, что сопряжено с высочайшей трудоемкостью и требуют высокой квалификации инженеров-диагностов [1-4].

Таким образом разработка эффективных систем генерации и синтеза тестов ЦУ по-прежнему является актуальной задачей.

Одним из подходов построения тестов ЦУ является вероятностное или случайное тестирование (ПСТ) ЦУ, которое сводится к генерированию случайных или псевдослучайных тестовых последовательностей (ПСП). Подход позволяет достаточно просто строить тесты и не нуждается в сложных алгоритмах анализа структуры или функций объекта диагностики (ОД), свойственных детерминированному синтезу тестов. Однако существенным недостатком данного подхода является низкая полнота теста, обычно не превышающая 50%. При детерминированном синтезе тестов принципиально возможно получить 100-процентную полноту, однако этот подход сопряжен с высочайшей трудоемкостью [5,6].

Поэтому для преодоления указанной проблемы полноты теста в данной работе предлагается поход адаптивного ПСТ на основе «распознавания ОД», обеспечивающий повышение полноты теста, сохраняя при этом главное достоинство вероятностного подхода – простоту реализации.

Исходное представление ЦУ как ОД

В качестве ОД в данной работе выступают последовательностные (с элементами памяти) ЦУ (ПЦУ), выполненные в виде типовых элементов замены (ТЭЗ) на микросхемах средней и малой степени интеграции. ТЭЗ представляется принципиальной схемой на базе PSpice-моделей компонент, подготовленной в графическом редакторе САПР и преобразованной в EDIF-формат. Далее схема из EDIF-формата с помощью встроенного в систему конвертора преобразуется в логическую схему в виде ISCAS-формата [7], построенную на элементарных логических элементах тип И, И-НЕ, ИЛИ, ИЛИ-НЕ, НЕ и элементах задержки сигналов. В качестве моделей неисправностей при синтезе и анализе тестов используются константные неисправности (КН) [1].

Альтернативный граф ОД Наряду со схемотехническим и другими способами представления может использоваться графовый способ представления ПЦУ [8-12].

Как известно, любое ПЦУ можно представить в виде конечного автомата (КА), описываемого шестеркой [8,9]:

$$A = (S, X, Y, F, V, S^0), \quad (1)$$

где: S - алфавит (или множество) состояний, X - входной алфавит, Y - выходной алфавит, F - функции переходов между состояниями, V - функция выходов, $S^0 \epsilon S$ - начальное состояние автомата.

Сложное (сильнопоследовательностное) ПЦУ можно представить в виде одного или множества (сети) КА [8]:

$$N = (Z, W, \{A_i\}, \{f_i\}, \{\Psi_i\}, g) , \quad (2)$$

где: $Z = \{Z_u\}$ - входной алфавит сети (множество внешних входов), W - выходной алфавит сети (множество внешних выходов ПЦУ),

$\{A_i\}$ - множество компонентных КА сети, каждый из которых описывается шестеркой типа (1). Входной алфавит КА представляется произведением внутреннего X_i' и внешнего X_i'' алфавитов автомата $X_i = X_i' X X_i''$;

{ :( ) - множество функций соединения сети;

$\{\Psi_i: Z \to X_i''\}$ - множество входных функций сети; $g:(\underset{j}{\times} Y_j) \to W$ - выходная функция сети.

Сильнопоследовательностное ПЦУ можно также представить структурно-функциональной моделью (СФМ) [10-12].

От одиночного КА А вида (1), сети КА N, либо СФМ можно перейти к следующей форме представления последовательностного ПЦУ [8]:

$$G = (S, X, Y, P, S^0), \quad (3)$$

где $P = \{X_{ij}\}$, $V(i,j)$ – множество входных векторов ЦУ, под воздействием которых КА переходит из одного состояния в другие состояния.

Представление (3) являются эквивалентным представлению (1), т.е. они идентично описывают поведение моделируемого ЦУ и отличаются только формой представления.

Множество P автомата G можно построить на основе множества функций $F=\{F_{ij}\}$ автомата A, где $F_{ij}=F_{ij}(S,X)$ – функция над входами и состояниями КА. Составляя уравнения для каждой такой функции вида $F_{ij}(S,X)=1$ и разрешая его относительно входных сигналов из множества X получаем множество корней $\{X_{ij}\}$, *где* $X_{ij}=\{x^1_{ij}, x^2_{ij}, \ldots, x^k_{ij},\}$ – двоичный входной вектор, обеспечивающий переход КА из состояния S_i в состояние S_j , $x^l_{ij} \in \{0,1\}$ – скалярный двоичный элемент вектора X_{ij}.

Если в документации имеется описание ПЦУ как КА в виде (1), (2), (3) или СФМ, то тестирование ПЦУ можно свести к синтезу детерминированных тестов путем обхода всех ветвей графа КА. В том же случае, когда автоматное описание ПЦУ отсутствует автомат или сеть автоматов ПЦУ могут быть частично или по возможности полностью построены автоматически путем моделирования устройства в ходе самого процесса тестирования ОД на исчерпывающем, случайном или псевдослучайном тесте. Такой подход, предлагаемый в данной работе, назовем *«распознаванием ОД»*.

Целью распознавания является построение так называемого альтернативного графа (АГ) ОД, который можно описать следующим четверкой:

$$G_a = (S', X, P', S'_0) , \quad (4)$$

где: $S'=\{S'_i\}$ - алфавит (множество) состояний АГ, $P'=\{P'_{ij}\}$ - множество входных векторов, обеспечивающих переходы между состояниями графа, $S'_0 \in S$ -

начальное состояние графа G, которое символизирует то состояние ОД, в которое он устанавливается при начальной установке («*инициализации*») ОД.

Граф G является «усеченным» графом (3) в том смысле, что он является в общем случае подмножеством последнего, что объясняется также тем, что в процессе моделирования мы не всегда можем построить полный АГ ПЦУ и представление (4) в отличие от (3) в общем случае содержит не все состояния и переходы между состояниями ОД: $G \subset A,\ P' \subset P,\ S \subset S'$. Множество P' не обязательно содержит всевозможные входные векторы, обеспечивающие переход между парами состояний; достаточно чтобы оно содержало только один такой вектор.

Адаптивное ПСТ на базе распознавания ОД

Сущность предлагаемого подхода АПСТ на базе распознавания ОД можно описать следующей последовательностью этапов.

1. Задание *исходного состояния* логической модели ОД путем установки всех триггерных элементов модели в безразличное состояние *'X'*.

2. *Инициализация ОД*, которая сводится к тому, чтобы под воздействием входной ПСП установить все триггерные элементы устройства из безразличного в определенное состояние лог. '0' или лог. '1'. В результате получается инициирующая последовательность *U*.

3. Если последовательность *U* путем псевдослучайного воздействия не удается построить, то применяется детерминированный синтез U, обеспечивающий гарантированный, но более трудоемкий процесс ее построения.

4. Далее начинается процесс ПСТ и построение альтернативного графа ОД. Вначале строятся тесты по принципу классической псевдослучайной генерации на основе линейных ПСП. Если при этом удается достичь требуемой полноты теста, процесс генерации теста прекращается. В противном случае, когда обнаружение новых КН прекращается в течение заданного времени запускается псевдослучайная генерация на основе нелинейных ПСП. При этом как на линейных, так и нелинейных тестах параллельно строится АГ.

5. В случае же, когда и на нелинейных тестах требуемой полноты теста достичь не удается запускается адаптивное ПСТ, которое сводится к так называемому «*блужданию по АГ*»: активизация состояний и переходов графа и поиск тестовых векторов для новых неисправностей ОД, которые добавляются к ранее построенному тесту.

Наряду с тестированием ОД на одном ПК с одноядерным процессором для повышения полноты теста адаптивное ПСТ может параллельно выполняться как одном ПК с многоядерным процессором, так и в составе локальной компьютерной сети (ЛКС) как с однопроцессорными та и с многоядерными ПК сети, т. е. используется «многопоточная» реализация процессов генерации теста и моделирования неисправностей. При этом на каждом процессоре ПК и сети в целом параллельно выполняется весь комплекс процессов распознавания, моделирования и ПСТ. АГ, построенные на отдельных процессорах ПК и ЛКС в целом «суммируются» на сервере сети по управлением последнего, как для одного «*тяжелого*» объекта, так и для группы ОД [13].

Экспериментальные исследования предложенного подхода распознавания и адаптивного ПСТ проводились в составе системы AGAT, разработанной авторами статьи [13-16]. Исследования проводились для двух групп ПЦУ: международного набора логических схем ISCAS'89 [8], на которых диагносты обычно проводят испытания своих разработок, и набора из 400-х цифровых ТЭЗ специализированного радиотехнического комплекса (СРТК). Последние по своей структуре и сложности аналогичны схемам первого набора. Исследования проводились как для традиционного, так и адаптивного ПСТ на основе распознавания ОД по широкому спектру параметров (полноте теста, времени генерации, длине теста и др.).

Исследования показали следующие основные результаты:

– традиционное ПСТ обеспечило диагностический стандарт полноты теста (80%) примерно для 40% ОД за приемлемое время (не более 30 мин/ОД);

– адаптивная ПСТ улучшает традиционную в среднем по полноте теста на 20%; для некоторых ПЦУ получен «взрывной» прирост полноты теста - до 63%.

– использование адаптивного ПСТ в ЛКС из 10-ти 2-х ядерных ПК позволило повысить число успешно протестированных ОД до 80%. При этом время тестирования не превышало 5 мин; для остальных «тяжелых» ОД тесты, сгенерированные в системе AGAT, достраивались до 80% полноты вручную.

Выводы

– Предложен метод распознавания ПЦУ и адаптивной генерации псевдослучайных тестов на его основе.

– Разработана система *АГАТ* распознавания и адаптивного псевдослучайного тестирования ПЦУ.

– Проведены масштабные экспериментальные исследования предложенного метода, которые показали высокую эффективность.

– Метод распознавания и адаптивного ПСТ и система АГАТ были реализованы при тестировании реальных ПЦУ СРТК и в учебном процессе ДонНТУ по курсу «Разработка и анализ тестов цифровых устройств».

– Поученные теоретические результаты и разработанное программное обеспечение могут быть также использованы при тестировании и верификации ПЦУ , построенных на базе ПЛИС, над чем в настоящее время работают авторы статьи совместно с сотрудниками лаборатории «FPGA-технологии проектирования и диагностики» ДонНТУ [14,15,17-19].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bushnell M.L. Essentials of electronic testing for digital, memory and mixed-signal VLSI circuits / NY: Springer, 2006. – 708 pp.

2. Markov I.L. Design, Analysis and Test of Logic Circuits under Uncertainty / NY: Springer, 2013. - 708 pp.

3. Jha N., Gupta S. Testing of Digital Systems / Cambridge: Cambridge University Press, 2003. - 1016 pp.

4. Сперанский Д.В., Скобцов Ю.А. Моделирование, тестирование и диагностика цифровых устройств / учебное пособие 3-е изд. - Москва: ИНТУИТ, 2020. – 529 с. // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: URL: http://www.iprbookshop.ru/94854.html (дата обращения: 30.12.2020). — Режим доступа: для авторизир. пользователей.

5. Yarmolik V.N., Demidenko S.N. *Generation and Application of Pseudorandom Sequences for Random Testing* / New Jersey: Wiley-Interscience, 1988. –176 pp..

6. Rene D. Random testing of digital circuits / NY: CRC Press, 1998. – 496 pp.

7. Brgles F., Bryan D., Kozminski K. Combinational profiles of sequential benchmark circuits // International symposium of circuits and systems, ISCAS-89. – 1989.– P. 1929-1934

8. Baranov S. Logic Synthesis for Control Automata. – Amsterdam: Kluwer, 1994. – 312 pp.

9. Barkalov A., Titarenko L., Krzywicki K. Logic Synthesis for FPGA-Based Mealy Finite State Machines / Florida: CRC Press, 2024. - 332 pp.

10. Ubar R., Raik J., Jenihin M. *Structural Decision Diagrams in Digital Test: Theory and Applications* / Birkhäuser: Computer Science Foundations, 2024. – 608 pp.

11. Mukherjee A. *Bond Graph in Modeling, Simulation and Fault Identification* / Florida: CRC Press, 2006. – 244 pp.

12. Зинченко Ю.Е., Зинченко Т.А. Структурно-функциональная модель управляющего устройства, представленного сетью конечных автоматов // Вычислительные технологии и прикладная математика: Материалы III науч. конф. с междунар. участием «ВТПМ-2024» Комсомольск-на-Амуре 7–11 октября 2024. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2024, С. 173-178.

13. Зинченко Ю.Е., Зинченко Т.А. Адаптивная генерация псевдослучайных тестов цифровых устройств РЭА и ЭВА // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении: материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «КомТех-2024»: в 2 т.; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2024, С. 316 – 325.

14. Зинченко Ю.Е., Калашников В.И., Хайдук С. и др. FPGA-технологии проектирования и диагностика компьютерных систем // Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование», т.1. Москва: МГУ, 2011. – С. 422-429.

15. Зинченко Ю.Е., Калашников В.И., Хайдук С. и др. Современные проекты FPGA-лаборатории ДонНТУ // Сборник трудов Международной научно-практической конференции в рамках I-го Международного научного форума ДНР «Донбасс-2015»: Инновационные перспективы Донбасса, 20-22 мая 2015. Донецк: ДонНТУ. 2015. – С. 4.

16. Зинченко Т.А., Зинченко Ю.Е., Дяченко О.Н. Разработка архитектуры интегрированной система генерации псевдослучайных тестов цифровых устройств // Информатика и кибернетика, № 4 (26), Донецк: ДонНТУ. 2021 – С. 27-33.

17. Зинченко Ю.Е. Т-модель дискретного устройства и решение диагностических задач на ее основе // Сб. II Междунар. семинара «Практика и перспективы институционного партнерства». / Вестник ТРТУ – ДонГТУ. - Донецк: ДонГТУ, 2001, № 1. - С. 36-47.

18. Сайт лаборатории ДонНТУ «FPGA-технологии проектирования и диагностика компьютерных систем». – Донецк: ДонНТУ, URL: http://fpga.donntu.ru.

19. Зинченко Ю.Е., Зинченко Т.А. Решение задач в системе тестирования знаний в области HDL- и FPGA-технологий // Инженер настоящего и будущего: практика и перспективы развития партнерства в высшем техническом образовании: Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «**ППРП-2024**»: в 2т. Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2024, - С. 239 - 251.

Автор: Зинченко Юрий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной инженерии ФГОУВО «Донецкий национальный технический университет», руководитель лаборатории «FPGA-технологии проектирования и диагностика компьютерных систем», Россия (ДНР), город Донецк, улица Артема 58, 83001, телефон: +7(949)486-55-46, email: zinchenko.yuri@gmail.com.

Автор: Зинченко Татьяна Анатольевна, старший преподаватель кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта ФГОУВО «Донецкий национальный технический университет», Россия (ДНР), город Донецк, улица Артема 58, 283001, телефон: +7(949)334-91-53, email: zinchenko.tatyana@gmail.com.

Author: Zinchenko Yuriy Evgenievich, candidate of technical sciences, associate professor of the computer engineering department of the "Donetsk National Technical University", leader of the laboratory "FPGA technologies for designing and diagnostics of computer systems", Russia (DPR), Donetsk, Artema street 58, 83001, phone: +7(949)486-55-46, email: zinchenko.yuri@ gmail.com.

Author: Zinchenko Tatyana Anatolyevna, senior lecturer of the Applied Mathematics and Artificial Intelligence Department of the "Donetsk National Technical University", Russia (DPR), Donetsk, Artema street 58, 83001, phone: +7(949)334-91-53, email: zinchenko.tatyana@gmail.com.

УДК 004.8:528.88

Данилова Ирина Игоревна

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЛЕСНЫХ ПОРОД ПО МАЛЫМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫМ ПАТЧАМ SENTINEL-2

В работе исследуется задача классификации лесных пород по мультиспектральным данным дистанционного зондирования со спутника Sentinel-2. Изображения представлены в виде малых патчей, что предъявляет особые требования к архитектуре моделей машинного обучения. Рассматриваются классические алгоритмы, нейросетевые архитектуры и предобученные сверточные сети. Показано, что при ограниченной пространственной структуре входных данных наилучшие результаты достигаются при использовании компактных моделей, фокусирующихся на спектральных признаках.

Классификация, дистанционное зондирование, лесные породы, спутник, машинное обучение, нейронная сеть, патч

Danilova Irina Igorevna

ANALYSIS OF MACHINE LEARNING MODELS FOR TREE SPECIES CLASSIFICATION BASED ON SMALL MULTISPECTRAL PATCHES FROM SENTINEL-2

This study explores the task of tree species classification using multispectral Sentinel-2 satellite data. The input is represented by small image patches, which imposes specific constraints on the choice of machine learning model architectures. Classical algorithms, custom neural networks, and pretrained convolutional networks are compared. The results indicate that compact models focused on spectral information perform best when spatial structure is limited.

Classification, remote sensing, tree species, satellite, machine learning, neural network, patch.

Введение

Задачи мониторинга растительного покрова на основе спутниковых данных приобретают всё большее значение в условиях изменения климата, деградации лесных территорий и необходимости точного учета биоразнообразия. Одним из эффективных инструментов для решения таких задач являются технологии дистанционного зондирования Земли, позволяющие получать регулярные и объективные сведения о состоянии поверхности. Особенно востребованы мультиспектральные изображения, полученные со спутников Sentinel-2. Эти данные активно применяются для классификации древесных пород, в том числе с использованием алгоритмов машинного обучения. Однако малая размерность изображений и наличие нескольких меток

одновременно на одном участке существенно усложняют выбор подходящей модели.

В данной работе рассматривается задача классификации лесных пород по спутниковым изображениям, представленных в виде патчей размером шесть на шесть пикселей, содержащих данные со спектральных каналов. Каждый фрагмент может одновременно содержать несколько классов, что требует решения задачи многометочной классификации. Цель исследования – определить, какие модели наиболее пригодны для такой задачи с учётом ограничений по размеру входных данных и наличия пространственно-спектральной информации.

Основная часть

Основная В качестве моделей для сравнения были выбраны шесть подходов: классические методы машинного обучения – метод опорных векторов (SVM) и метод случайного леса (RF); нейросетевые архитектуры собственной разработки – многослойный перцептрон (MLP) и компактная сверточная сеть (CNN); а также предобученные глубокие архитектуры ResNet50 и DenseNet121, адаптированные для работы изображениями малого размера.

Данные представляли собой фрагменты изображений с аннотациями, где для каждого участка указаны доли площадей, занятых породами деревьев. В выборку были включены семь пород деревьев: берёза, лиственница, ель, сосна, дуб, клён и ясень.

Оценка качества моделей проводилась по ключевым метрикам: точность (accuracy), полнота (recall), точность предсказаний (precision), F1-мера и площадь под ROC-кривой (ROC AUC). Для подбора гиперпараметров использовалась байесовская оптимизация, что позволило обеспечить репрезентативные сравнения при ограниченных вычислительных ресурсах. Сводные результаты по всем моделям представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительные значения метрик для исследуемых моделей

Модель	Accuracy	Precision	Recall	F1-score	ROC AUC
SVM	0,44	0,50	0,62	0,56	0,83
Random Forest	0,43	0,62	0,47	0,53	0,85
MLP	0,89	0,71	0,49	0,58	0,88
CNN	0,87	0,63	0,56	0,59	0,87
ResNet50	0,86	0,59	0,48	0,53	0,85
DenseNet121	0,85	0,57	0,47	0,50	0,83

Классические методы машинного обучения продемонстрировали ограниченные возможности. Модель SVM чаще находила нужные породы, но при этом нередко ошибалась – находила породы там, где их не было. RF, наоборот, делала более уверенные, но менее чувствительные предсказания – часто упускала редкие классы, но если уже отмечала наличие породы, то делала это достаточно точно. Обе модели не справлялись с задачей, когда в кадре

одновременно присутствует несколько деревьев, и не учитывали структуру изображения, воспринимая его просто как набор чисел.

Собственные нейросетевые архитектуры показали гораздо лучшее поведение. Модель MLP, несмотря на простую структуру, стабильно и надёжно распознавала основные породы и почти не делала ложных предсказаний. Она хорошо работала в тех случаях, когда участок был покрыт одной-двумя чётко выраженными породами. В то же время, из-за отсутствия учёта пространственной структуры, модель хуже справлялась с редкими или смешанными классами.

Сверточная сеть CNN оказалась лучше при работе со сложными участками. Она точнее выделяла зоны с редкими породами и в целом лучше распознаёт сочетания нескольких деревьев на одном патче. Модель была более чувствительна к слабым признакам и лучше дифференцировала участки с визуально близкими породами, например, ясень и берёзу. В то же время, CNN была склонна к большему количеству ложных срабатываний по сравнению с MLP.

Предобученные архитектуры ResNet50 и DenseNet121, несмотря на большую глубину и мощность, не показали значительного выигрыша. Обе модели успешно определяли доминирующие породы и могли обобщать информацию, но делали это не точнее, чем собственные компактные архитектуры. В частности, ResNet50 часто повторяла выводы CNN, но с чуть меньшей уверенность в редких классах, а DenseNet121 чаще путалась в изображениях с множественными породами. При этом обе модели работали ощутимо дольше и требовали в несколько раз больше ресурсов при сопоставимом качестве предсказаний.

Сравнение времени обучения и инференса показало существенные различия между классами моделей. Классические алгоритмы SVM и RF демонстрировали минимальные затраты времени: обучение выполнялось существенно быстрее по сравнению с нейросетевыми моделями, а предсказание выполнялось практически мгновенно. Собственные нейросетевые модели (MLP и CNN) требовали в несколько раз больше времени на обучение, но обеспечивали более высокое качество. CNN работала чуть медленнее MLP как при обучении, так и при инференсе. Наиболее ресурсоёмкими оказались предобученные модели ResNet50 и DenseNet121: их обучение и использование занимали в несколько раз больше времени по сравнению с компактными архитектурами, что снижает их применимость на практике.

Дополнительный анализ ошибок показал, что наиболее частыми были случаи путаницы между породами со схожими спектральными характеристиками, такими как берёза, клён и ясень. MLP демонстрировал высокую точность при распознавании преобладающих пород, однако в ситуациях с множественными пересекающимися метками чаще ошибался. CNN лучше справлялся с выделением пород с выраженной пространственной структурой, таких как ель и лиственница, благодаря использованию локальных признаков. Классические методы в ряде случаев игнорировали редкие классы и были чувствительны к дисбалансу выборки.

С учётом полученных результатов можно рекомендовать MLP в качестве эффективной базовой модели для задач, где приоритетом является высокая точность и низкие вычислительные затраты. CNN, в свою очередь, целесообразно использовать в задачах, чувствительных к полноте, особенно при необходимости надёжного распознавания редких пород. Предобученные глубокие архитектуры уступают по большинству метрик и требуют значительно больших затрат при несущественном приросте качества. Классические алгоритмы могут использоваться как ориентир, но показывают ограниченную применимость в условиях многометочной структуры и малых изображений.

Выводы

Проведённый анализ показал, что при классификации лесных пород по мультиспектральным спутниковым изображениям малого размера наилучшие результаты достигаются с использованием специализированных, компактных нейросетевых архитектур.

Во-первых, классические модели машинного обучения оказались непригодными для рассматриваемой задачи ввиду неспособности учитывать пространственные связи между пикселями, что критично при работе с изображениями.

Во-вторых, глубокие предобученные сверточные модели не продемонстрировали ожидаемого превосходства, поскольку их архитектурные особенности не соответствуют малому размеру входных данных и приводят к избыточной агрегации информации.

В-третьих, наилучшие результаты достигнуты с помощью MLP, что обусловлено высокой значимостью спектральных признаков и слабой выраженностью пространственных структур в малых патчах. Сверточная модель CNN, несмотря на немного более низкие значения точности, показала лучшую полноту и F1-меру, что делает её предпочтительной в задачах, чувствительных к пропущенным классам.

Полученные результаты позволяют рекомендовать MLP в качестве базовой модели для классификации растительности по мультиспектральным данным малого масштаба, а компактные CNN – в случаях, когда необходима устойчивость к редким меткам и сбалансированная оценка всех классов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаев А. С., Барталев С. А., Лупян Е. Ф., Лукина Н. В. Спутниковое зондирование Земли – уникальный инструмент мониторинга лесов России // Вестник Российской академии наук. – 2014. – Т. 84, № 12. – С. 1073–1079.

2. Барталев С. А., Лупян Е. А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 197–214.

3. Friedl M. A., Brodley C. E. Decision tree classification of land cover from remotely sensed data // Remote Sensing of Environment. – 1997. – Vol. 61, No. 3. – P. 399–409.

4. Pulella A., Rodrigo A. S., Francescopaolo S. et al. Multi-temporal Sentinel-1 backscatter and coherence for rainforest mapping // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12, No. 5. – Article 847.

5. Wang P., Fan E., Wang P. A comparative analysis of image classification algorithms based on traditional machine learning and deep learning // Pattern Recognition Letters. – 2020. – Vol. 141. – P. 61–67.

6. Rina S., Ying H., Shan Y. Application of machine learning to tree species classification using active and passive remote sensing: a case study of the Duraer Forestry Zone // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, No. 10. – Article 2596.

7. Immitzer M. et al. Optimal input features for tree species classification in Central Europe based on multi-temporal Sentinel-2 data // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, No. 22. – Article 2599. – DOI: 10.3390/rs11222599.

8. Sheeren D. et al. Tree species classification in temperate forests using Formosat-2 satellite image time series // Remote Sensing. – 2016. – Vol. 8, No. 9. – Article 734.

9. Ghasempour R., Roushangar K., Ozgur Kirca V. S., Demirel M. C. Analysis of spatiotemporal variations of drought and its correlations with remote sensing-based indices via wavelet analysis and clustering methods // Mobile Networks and Applications. – 2022. – Vol. 53, Issue 1. – P. 81–93.

10. Leon G., Fiorentini N., Leandri P., Losa M. A new region-based minimal path selection algorithm for crack detection and ground truth labeling exploiting Gabor filters // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, No. 11. – Article 2722.

Данилова Ирина Игоревна, студентка Самарского университета им. Королева, Россия, город Самара, Московское шоссе, 34, 443086, телефон: + 7 (967) 715-80-29, email: irinkadanigor@gmail.com.

Danilova Irina Igorevna, student of the Samara National Research University, 443086, Russia, Samara, 34 Moskovskoye shosse, phone: + 7 (967) 715-80-29, email: irinkadanigor@gmail.com.

УДК 621.398

Колесова Кира Алексеевна, Леонова Антонина Валерьевна, Шпаковская Оксана Юрьевна

РАЗРАБОТКА IOT-УСТРОЙСТВА «УМНАЯ КЛЕТКА ДЛЯ ПТИЦ»

Разработана концепция IoT-устройства "Умная клетка для птиц" для автоматического контроля микроклимата, кормления и освещения. Подтверждена актуальность, предложены решения
Умная клетка, IoT, датчики, автоматизация, птицы, микроклимат, освещение, очищение, микроконтроллер

Kolesova Kira Alekseevna, Leonova Antonina Valeryevna, Shpakovskaya Oksana Yurievna

DEVELOPMENT OF AN IOT "SMART BIRD CAGE" DEVICE

An IoT "Smart Bird Cage" concept is developed for automated microclimate, feeding, and lighting control. The relevance is confirmed, and solutions are proposed.
Smart cage, IoT, sensors, automation, birds, microclimate, lighting, feeding.

Современные технологии все глубже проникают в нашу повседневную жизнь, и содержание домашних животных – не исключение. Рынок устройств для домашних питомцев переживает настоящий бум, и одним из перспективных направлений является создание "умных" решений, облегчающих уход за животными и обеспечивающих их комфорт и безопасность. В этой работе мы рассмотрим разработку IoT-устройства под названием "Умная клетка для птиц" – решения, которое позволит владельцам удаленно контролировать и управлять условиями содержания своих домашних питомцев.

Владельцы птиц часто сталкиваются с трудностями поддержания оптимальных условий в клетке: уровня освещенности, контроля чистоты клетки и своевременной уборки, контроля температуры, влажности, наличия корма и воды требует постоянного внимания. Отклонения от нормы могут негативно сказаться на здоровье и самочувствии птицы. Нарушения в световом ритме могут привести к целому спектру нежелательных последствий: от снижения иммунитета до потери голоса и отказа от питания. Особенно остро данная проблема проявляется в условиях резких смен сезонов и климатических особенностей северных регионов, где продолжительность дня может существенно отклоняться от физиологической нормы. В подобных условиях становится актуальной задача создания системы, способной автоматически регулировать освещённость в клетке, адаптируясь под внешние условия и режим дня птицы. Актуальность разработки подтверждена результатами опросов: более 50% владельцев декоративных птиц сообщают о проблемах, связанных с ночной активностью питомцев, плохим сном или реакцией на искусственный свет в ночное время. На основании

обзора существующих решений [1-5] очевидно, что большинство предлагаемых клеток либо не имеют функции регулирования освещения, либо используют ручные методы (например, накрывание тканью), либо обладают завышенной стоимостью и избыточной сложностью, часто зарубежного происхождения. Ни одно из решений не учитывает одновременно физиологические потребности птицы, бытовой комфорт владельца и экономическую доступность.

Целью разработки "Умная клетка для птиц" является создание IoT-устройства, способного автоматически мониторить и регулировать параметры микроклимата в клетке, а также уведомлять владельца о критических ситуациях.

"Умная клетка" представляет собой комплексное решение, концепция которого показана на рис. 1. Устройство включает в себя четыре блока: микроклимат, кормление и поение, очистка и дезинфекция и видеонаблюдение. Микроконтроллер выступает в роли "мозга" системы, обрабатывая данные с датчиков, управляя исполнительными механизмами и обеспечивая связь с внешним миром. Используются датчики (температуры и влажности для контроля микроклимата в клетке; уровня освещенности для имитации естественного светового дня; уровня корма и воды для своевременного пополнения запасов), исполнительные механизмы (двигатель для движения вала; сервопривод для управления шторками, нагреватель для поддержания оптимальной температуры в холодное время года; увлажнитель для поддержания оптимальной влажности; светодиодная лампа для имитации естественного светового дня; автоматическая кормушка и поилка для своевременного пополнения запасов корма и воды).

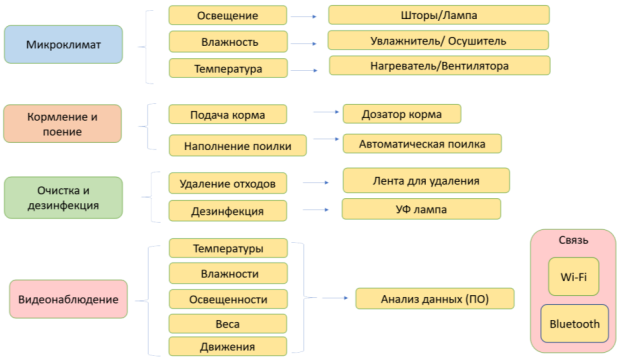


Рис.1 Концепция IoT-устройства "Умная клетка для птиц"

Модуль связи (Wi-Fi/Bluetooth) обеспечивает подключение к домашней сети и интернету. Позволяет удаленно контролировать и управлять клеткой через мобильное приложение или веб-интерфейс. Сервер обработки данных (облачный сервис) для хранения и анализа данных, полученных от клетки. Реализация логики управления и алгоритмов машинного обучения (например, для прогнозирования потребления корма или выявления аномалий в поведении птицы).

Мобильное приложение/Веб-интерфейс служит для отображения текущих параметров микроклимата в клетке, удаленного управления исполнительными механизмами, уведомления о критических ситуациях (низкий уровень корма/воды, отклонения от нормы температуры/влажности, необычное поведение птицы) и статистики и графиков изменения параметров во времени.

В рамках исследования был разработан прототип «умной клетки» для декоративных птиц, оснащённой системой автоматического регулирования освещения и очистки клетки. Одной из задач разработки стало воспроизведение природного суточного цикла света с помощью управляемых электронных компонентов, что позволит минимизировать стресс у птиц и упростить уход за ними для владельцев. Техническая архитектура устройства построена на базе микроконтроллера ESP32, обладающего встроенными модулями Wi-Fi и Bluetooth [6-9]. Система включает фотодатчик, фиксирующий уровень освещённости внутри и снаружи клетки, а также исполнительный механизм в виде сервопривода, управляющего положением жалюзи. Управление может осуществляться как в автоматическом режиме (по сигналу датчика и расписанию), так и вручную – через мобильное приложение. Питание устройства осуществляется от стандартного адаптера 5-12 В, что обеспечивает безопасность при эксплуатации в домашних условиях.

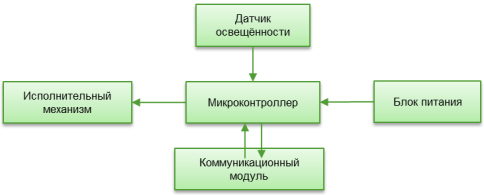


Рис.2 Структурная схема IOT-устройства «Умная клетка для птиц»

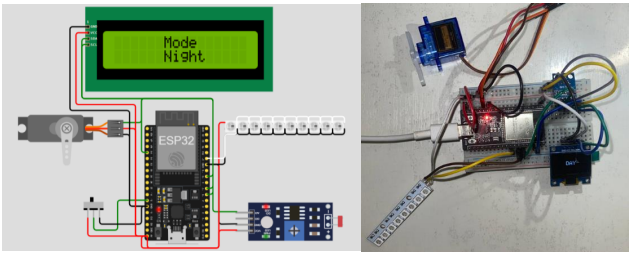


Рис.3 Моделирование и прототип блока регулировки освещением

Принцип работы системы реализован через периодическую (каждые 30-60 секунд) оценку текущего уровня освещённости. При превышении установленного порога система закрывает жалюзи, снижая световую нагрузку. Если освещённость падает ниже порога, а текущее время соответствует активному дневному режиму, жалюзи открываются. Также система может включать/выключать встроенные светодиоды, имитируя рассвет или закат. Управление режимами

осуществляется через приложение с возможностью настройки расписания и получения уведомлений.

Для реализации функции автоматической отчистки необходимо обеспечить с требуемой периодичностью выполнения алгоритма согласовывая работу специализированных аппаратно-программных средств. Механически процедура очистки может быть реализована многими способами:

1. Выдвижение лотка, поворот его на 180° над приемным контейнером, обратный поворот на 180° и установка лотка на прежнее место.
2. Используя лоток без бортика механическая очистка (сметание) щеткой в контейнер, находящийся ниже и выступающий за пределы дня клетки.
3. Использовать непрерывную бумажную салфетку в рулоне с двумя узлами: подающим и принимающим. Периодически принимающий узел поворачивается на угол достаточный для замены ленты внутри клетки на чистый участок.

Первые два способа реализуемы, но предполагают использование сложной механики и непростых алгоритмов управления. Особенно проблемно здесь оценка степени чистоты поддона, если загрязнение имеет не сухой, а жидкий или полужидкий характер. Поэтому в данной разработке останавливаемся на третьем варианте, который свободен от этих недостатках. Наиболее просто приемный узел можно реализовать с использованием шагового двигателя, муфты и цилиндра, на который наматывается бумажная лента. Подающий узел должен обеспечить определенное непрерывное натяжение ленты, с тем чтобы подающий моток из бумажной ленты не раскручивался. Шаговый двигатель [10] характерен тем, что при небольших угловых скоростях способен создавать значительные моменты. В нашем случае момент нужно выбрать так, чтобы он с одной стороны обеспечивал движение ленты, а с другой стороны не приводил к ее обрыву. Оценим угол, на который необходимо повернуть приемный узел, чтобы очистить дно клетки. Примем за допущение, что диаметр приемного узла D меняется незначительно. Тогда длина окружности L приемного узла описывается выражением

$$L = \pi D. \qquad (1)$$

Если длина клетки Lk, тогда количество оборотов шагового двигателя, чтобы очистить клетку равна Lk/L. Основная масса шаговых двигателей совершает один оборот за 200 шагов в режиме «шаг», тогда определим количество шагов шагового двигателя необходимого для очистки клетки по следующей формуле

$$n\text{Ш} = \frac{200Lk}{\pi D}. \qquad (2)$$

Рассмотрим организацию управления шаговым двигателем от микроконтроллера. Шаговый двигатель, например, Nema17 имеет две обмотки и управляется

импульсами тока в обмотках, сдвинутыми по фазе. Для формирования этих импульсов можно использовать специальный контроллер DRV8825. На вход этого контроллера подаются логические напряжения от МК от 3,3 до 5 В. Ток в силовых обмотках шагового двигателя формируется путем коммутации отдельного источника напряжения от 8 до 12 В. Входных сигналов от МК достаточно много – 7 сигналов. Для нас наиболее важные являются два сигнала DIR (направление) и STEP (шаг). Сигнал DIR указывает против часовой или по часовой стрелки вращается двигатель, а STEP (шаг) формирует шаг двигателя. Например, для того чтобы поворачивать шаговый двигатель со скоростью 1 оборот/ сек необходимо сформировать 200 импульсов сигнала STEP (шаг). 1 сек = 1000 мск, период сигнала STEP (шаг) = 1000/200= 5 мск, тогда длительность импульса 2,5 мск (в случае если сигнал имеет форму меандра). В программной реализации это выглядит достаточно просто. Устанавливаем вывод положения STEP (шаг) в 1, делаем задержку на 2500 мкс, устанавливаем сигнала в 0 и делаем задержку на 2500 мкс. Если повторить этот цикл 200 раз, то двигатель сделает один оборот. На рис.5 показан макет блока, реализующего очистку клетки

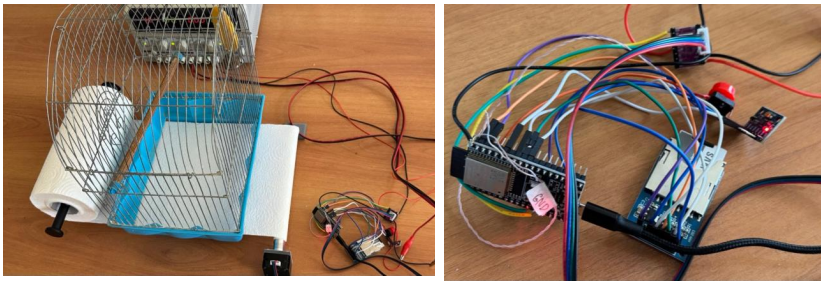


Рис.5 Макет блока очистки клетки

Выводы

Прототип "Умной клетки для птиц" описанный в данной работе демонстрирует перспективность использования IoT-технологий для улучшения условий содержания домашних животных. Дальнейшее развитие проекта может включать интеграцию дополнительных датчиков для мониторинга температуры, влажности, уровня корма и воды, использование алгоритмов машинного обучения для анализа поведения птицы и выявления признаков заболеваний. Разработка мобильного приложения с интуитивно понятным интерфейсом для удаленного управления и мониторинга системы и интеграция с системами "умного дома" также может значительно облегчить уход за домашними питомцами и улучшить их благополучие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИИ СПИСОК

1. Reli Birddy [Электронный ресурс]. – URL: https://hi-tech.mail.ru/news/119878-predstavlena-pervaya-umnaya-kletka-dlya-popugaev/ (дата обращения: 20.05.2025).
2. Ferplast PALLADIO 4 [Электронный ресурс]. – URL: https://zoomir-vsem.ru/product/ferplast-kletka-dlya-ptits-palladio-4-chernaya-59-33-69-sm-1404645413.html (дата обращения: 20.05.2025).
3. Ferplast GRETA [Электронный ресурс]. – URL: https://magizoo.ru/catalog/ferplast_1/1216734/ (дата обращения: 20.05.2025).
4. Edem 3 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.medicalexpo.ru/prod/tigers/product-118707-1099221.html (дата обращения: 20.05.2025).
5. Perfitel Bird Cage Cover [Электронный ресурс]. – URL: https://www.amazon.com/Perfitel-Black-Out-Birdcage-Breathable-Washable/dp/B0DHWXKSFM?th=1 (дата обращения: 20.05.2025).
6. Синютин С.А., Леонова А.В. Разработка киберфизических систем на основе микроконтроллеров. – РнД.: ЮФУ, 2014.
7. А.В., Петров И.А. Основы микропроцессорных систем управления. – М.: НТЛ, 2016.
8. Богданов В.А. Системы автоматического управления. – М.: Высшая школа, 2005.
9. Курносов Д.И., Литвинов В.П. Программирование микроконтроллеров на языке С++. – М.: БХВ-Петербург, 2014.
10. Библиотека для шагового двигателя Arduino v2.2.0 [Электронный ресурс]. – URL: https://alexgyver.ru/gyverstepper/ (дата обращения: 20.05.2025).

Автор: Колесова Кира Алексеевна, студент ИРТСУ Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Энгельса, д.1, 347900, телефон: +79061850431, email: kkolesova@sfedu.ru.

Автор: Леонова Антонина Валерьевна, доцент ИРТСУ Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Энгельса, д.1, 347900, телефон: +79043467991, email: leonova@sfedu.ru.

Автор: Шпаковская Оксана Юрьевна, заведующий лабораторией ИРТСУ Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Энгельса, д.1, 347900, телефон: +79061850431, email: oshpakovskaya@sfedu.ru.

Author: Kolesova Kira Alekseyevna, Student, Institute of Radio Engineering Systems and Control, SFEDU, Russia, 347900, Taganrog, Engels Street, 1. Phone: +79061850431, email: kkolesova@sfedu.ru

Author: Antonina Leonova, Associate Professor, Institute of Radio Engineering Systems and Control, SFEDU, Russia, 347900, Taganrog, Engels Street, 1. Phone: +79043467991, email: leonova@sfedu.ru . **Author: Oksana Shpakovskaya**, Head of the Laboratory of the Institute of Radio Engineering Systems and Control, SFEDU, Russia, 347900, Taganrog, Engels Street, 1. Phone: +79061850431, email: oshpakovskaya@sfedu.ru .

УДК 681.33

Удод Евгений Васильевич

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ОЦЕНКЕ СУММАРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ВСТРАИВАЕМОЙ СИСТЕМЫ

В данной работе рассмотрены составляющие суммарной погрешности встраиваемой системы. Проанализирована схема формирования погрешностей при обработке данных в таких системах. Показано как с применением компьютерного моделирования можно предъявить требования к компонентам встраиваемой системы, которые влияют на суммарную погрешность. Даны рекомендации по оптимизации встраивамых систем для обеспечения требуемой погрешности.

Ключевые слова: погрешность, суммирование погрешностей, система сбора данных, обработка информации, встраиваемая система, компьютерное моделирование.

Udod Evgeniy Vasilyevich

COMPUTER SIMULATION IN ESTIMATING THE TOTAL ERROR OF AN EMBEDDED SYSTEM

In this paper, the components of the total error of the embedded system are considered. The scheme of error generation during data processing in such systems is analyzed. It is shown how, using computer modeling, it is possible to impose requirements on the components of an embedded system that affect the total error. Recommendations are given on optimizing embedded systems to ensure the required error.

Keywords: error, error summation, data collection system, information processing, embedded system, computer modeling.

Введение

Перспективным направлением в развитии систем собирающих и обрабатывающих информацию в промышленности является создание встраиваемых систем.

Встраиваемая система (англ. embedded system) – специализированная микропроцессорная система управления, контроля и мониторинга, концепция разработки которой заключается в том, что такая система будет работать, будучи встроенной непосредственно в устройство, которым она управляет.

Точность – ключевой параметр встраиваемой системы. Когда говорят о точности, обычно имеют в виду его погрешность. Погрешность – это разница между показаниями реального измерительного прибора и идеального [1].

Суммарная погрешность встраиваемой системы определяется как её компонентами, например датчиками, усилителями, аналого-цифровыми преобразователями, так и применяемыми алгоритмами и численными методами.

В общем виде погрешности встраиваемой системы можно представить в виде суммы методологической погрешности γ, трансформированной погрешности ν, методической погрешности μ, инструментальной погрешности β и динамической погрешности θ [2].

Пусть некоторый процесс обработки информации описывается функцией:

$$Y = \Phi (X_1,X_2,X_3 ...,X_m),$$

где Xj – входные переменные.

На практике вместо функции используется ее аналитическая модель:

$$Y = F (X_1,X_2,X_3 ...,X_n),$$

в результате чего имеет место неустранимая погрешность:

$$\gamma = | \Phi (X_1,X_2,X_3 ...,X_m) – F (X_1,X_2,X_3 ...,X_n)|$$

Данная погрешность классифицируется как методологическая и не подлежит количественной оценке или вычислению. В рамках анализа проводится тщательное исследование существующих теоретических математических моделей и областей их потенциального применения. С применением методологического подхода, основанного на экспертном мнении, осуществляется выбор оптимальной математической модели, способной наиболее точно и адекватно описывать исследуемый процесс при сохранении максимальной простоты и интерпретируемости. На данном этапе критически важную роль играет квалификация эксперта и его глубокое понимание специфики исследуемого процесса, что обеспечивает корректность и релевантность выбранного математического аппарата.

Другим источником погрешностей во встраиваемых системах являются входные переменные, так как для определения значений используемой функций вместо точных значений X_j могут быть использованы только приближенные значения переменных $\boldsymbol{X}^*_j$. Это обусловлено погрешностями применяемых в системе датчиков.

Погрешности переменных X_j трансформируются в результате вычисления функций. При этом трансформированная погрешность может быть определена как разность:

$$\nu = | F (X_1,X_2,X_3 ...,X_n) – F (X^*_1,X^*_2,X^*_3 ...,X^*_n)|.$$

Анализ данной погрешности является критически важным этапом для оптимального выбора датчика. В практических условиях возникает необходимость решения, как прямой задачи, так и обратной. Прямая задача заключается в определении результирующей погрешности обработки данных во встраиваемой системе при заданной погрешности датчика. Обратная задача, напротив, предполагает установление предельно допустимой трансформированной погрешности и последующий выбор датчика с соответствующей точностью измерений.

Процесс компьютерной оценки трансформированной погрешности можно представить на рис. 1.

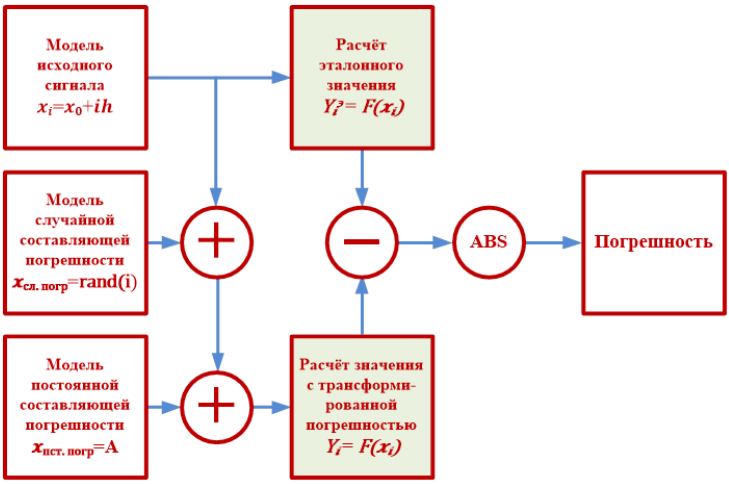


Рис. 1 Процесс компьютерной оценки трансформированной погрешности

Или в виде последовательности действий:

1) Выбираются аналитические функции, описывающие поведение сигналов Xj(x) (j = от 1 до L) при изменении независимой переменной x на интервале $[x_0, x_k]$ с шагом h:

$$x_i = x_0 + ih,$$

где j – номер рассматриваемого сигнала;

i – номер текущего значения в рассматриваемом сигнале;

2) С помощью высокоточных численных методов рассчитываются эталонные значения функции:

$$Y^э_i = F^э (X^э_1(x_i),X^э_2(x_i),X^э_3(x_i) ...,X^э_L(x_i))$$

3) После этого составляется программа вычисления значений смесей сигналов $X_j(x)$ с погрешностями $q_j(x)$:

$$X^*_j = X_j(x) + q_j(x) \text{ (j от 1 до L).}$$

4) В общем случае погрешность $q_j(x)$ является либо постоянной величиной, либо переменной неслучайной или случайной функцией и описывается выражением:

$$q_j(x) = A_{qj}\, \varphi_j(x) + q^0_j$$

где A_{qj} – амплитуда,

$\varphi_j(x)$ – функция, моделирующая погрешность j-го датчика,

q^0_j – смещение функции $A_{qj}\, \varphi_j(x)$.

5) Значения полученных сигналов используются для расчета результатов преобразований:

$$Y^э_i = F^э (X^э_1(x_i),X^э_2(x_i),X^э_3(x_i) ...,X^э_L(x_i))$$

содержащих значения трансформированной погрешности ν_i (i = 1,2,…,k), которые определяются на каждом шаге i.

$$\nu = | F (X_1,X_2,X_3 ...,X_n) – F (X^*_1,X^*_2,X^*_3 ...,X^*_n)|.$$

Следующим значимым источником погрешности во встраиваемых системах является необходимость замены точного вычисления функции $F(X_1, X_2, X_3, ..., X_n)$ на приближенное значение функции $F^*(X_1, X_2, X_3, ..., X_n)$, полученное с использованием численных методов. Причиной такой замены служит то, что современные микроконтроллеры не имеют аппаратной реализации всех известных математических функций. И замена будет происходить либо на уровне компилятора или интерпитатора, либо разработчиком системы, если быстродействие или точность автоматических методов не будет достаточна для решаемой задачи. Данная погрешность, обусловленная применением аппроксимационных алгоритмов, классифицируется как методическая. В математической форме она представляется следующим образом:

$$\mu = | F((X^*_1, X^*_2, X^*_3 ..., X^*_n) - F^*((X^*_1, X^*_2, X^*_3 ..., X^*_n)|.$$

Процесс компьютерной оценки методической погрешности можно представить на рис. 2.

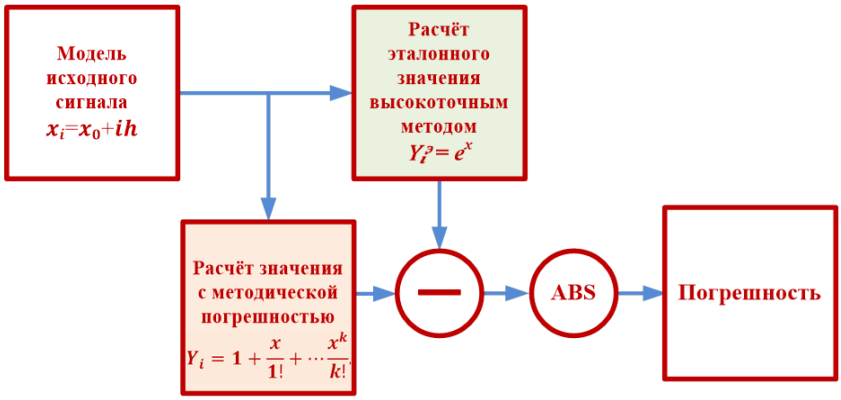


Рис. 2 Процесс компьютерной оценки методической погрешности

Примером методической погрешности может служить использование разложения в ряд Тейлора или Макларена для вычисления тригонометрических и иных функций, численное интегрирование и аппроксимация сложных функциональных зависимостей. Эти процедуры, несмотря на свою эффективность в ряде приложений, могут быть подвержены систематическим ошибкам, обусловленным усечением рядов и аппроксимацией. Важно отметить, что подобные погрешности могут существенно влиять на точность результатов, особенно в задачах, требующих высокой степени точности, таких как инженерные расчеты, моделирование или управление физическими процессами.

Еще одна погрешность возникает из-за необходимости во встраиваемых системах выполнять арифметические операции с ограниченной разрядной сеткой. При этом вместо функции $F^*((X^*_1, X^*_2, X^*_3 ..., X^*_n)$ определяется функция $F^{**}((X^*_1, X^*_2, X^*_3 ..., X^*_n)$ (с инструментальной погрешностью:

$$\beta = | F^*((X^*_1, X^*_2, X^*_3 ..., X^*_n) - F^{**}((X^*_1, X^*_2, X^*_3 ..., X^*_n) |$$

В качестве иллюстрации подобной погрешности можно привести процесс округления данных при аналого-цифровом преобразовании. Также следует упомянуть вычисления в микроконтроллерах, осуществляемые в формате с ограниченной разрядностью. Эти меры часто предпринимаются для оптимизации использования оперативной памяти и повышения эффективности вычислительных операций.

Процесс компьютерной оценки инструментальной погрешности можно представить на рис. 3.

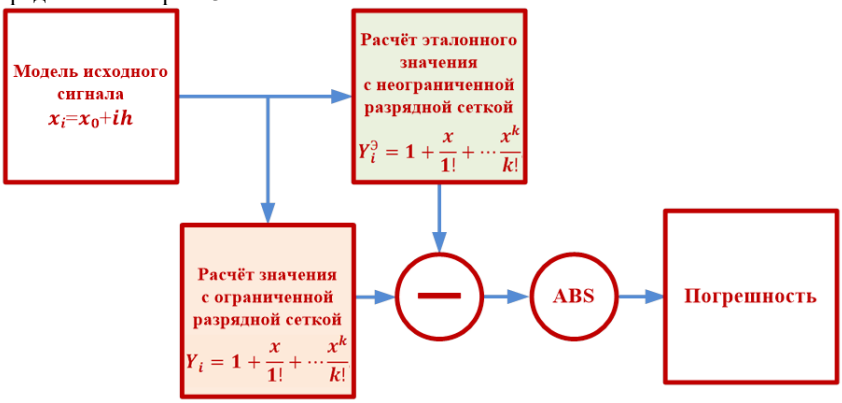


Рис. 3 Процесс компьютерной оценки инструментальной погрешности

Динамическая погрешность во встраиваемых системах возникает вследствие временной задержки между моментом поступления входных данных X(t) и моментом завершения вычислительного процесса F(t). В момент t+τ, когда вычисления завершены, результат F(t) основывается на устаревших данных X(t), в то время как актуальные входные данные уже приняли значение X(t + τ). Таким образом, реальное значение решения задачи должно быть F(t+τ), что приводит к возникновению динамической погрешности:

$$\theta = |F(t) - F(t + \tau)|.$$

В реальных системах, где критически важна точность и актуальность данных, необходимо минимизировать эту погрешность. Зачастую это достигается за счёт оптимизации вычислительного процесса таким образом, чтобы время решения задачи τ было существенно меньше времени изменения входных данных. Это позволяет обеспечить приемлемую точность сбора и обработки данных, минимизируя влияние динамической погрешности на конечный результат.

Для достижения поставленной цели можно использовать разнообразные инструменты компьютерного моделирования. Среди них языки программирования, такие как C++ и Python, которые обеспечивают высокую гибкость и расширяемость моделирования. Однако, для более наглядного и интуитивного представления исследуемых процессов, особенно в контексте

встраиваемых систем, наиболее предпочтительным методом является графическое моделирование с использованием специализированного программного обеспечения, такого как Simulink. Пример подобной графической модели представлен на рис 4.

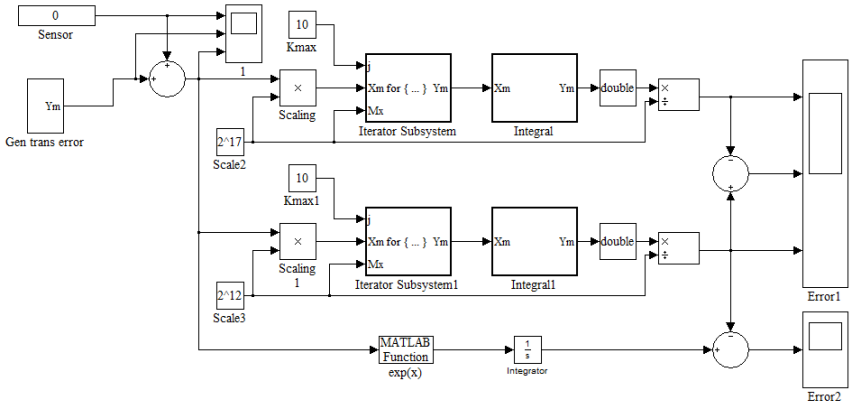


Рис. 4 Модель определения суммарной погрешности встраиваемой системы

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник – Москва: Техносфера, 2005. – 592 с.

2. Пьявчснко О.И. Проектирование локальных микрокомпьютерных систем. - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. - 238 с.

3. Мокров Е.А. Создание датчиковой измерительной аппаратуры для ракетно-космической техники // Вестник Поволжского регионального отделения академии космонавтики. Самара, 1998. С. 65√70.

4. Датчики давления серии метран.// URL:http://www.medteh.info/_fr/14/metran_nastr.pdf (дата обращения: 05.05.2025).

5. ГОСТ 8.009-84

6. Слива Е. Коррекция по температуре измерительных преобразователей физических величин на базе микроконтроллера MSP430F149 фирмы Texas Instruments.// URL: http://chipinfo.ru/literature/chipnews/200105/3.html (дата обращения: 05.05.2025).

Автор: Евгений Васильевич Удод, кандидат технических наук, доцент кафедры встраиваемых и радиоприёмных систем Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347922, телефон: +7(863) 218-40-00 доб.30119, email: udodev@mail.ru

Author: Eugene Vasilevich Udod, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor of embedded and radio receiving systems Southern Federal University, 347922, Russia, Taganrog, Nekrasovsky lane, 44, phone+7(863) 218-40-00 add.30119, email: udodev@mail.ru

УДК 528.8:556

Akshay V. Kshirsagar, Dr. Ratnadeep R. Deshmukh, Ankush S.Chavan

STUDY OF DIFFERENT TECHNIQUES FOR WATER SURFACE AREA CALCULATION OF WATER RESERVIOR BY USING REMOTE SENSING AND GIS

Abstract: Given that the reservoir supports industrial demands, provides drinking water, and provides irrigation for the city, it is imperative to monitor the Dam's surface water area. An effective method for estimating this surface water area is to use satellite photography in conjunction with remote sensing and GIS approaches. Multispectral data with a spatial resolution of 30 meters was used in this investigation from the Landsat-8 satellite. The eight-year period from 2014 to 2022 is the main focus of the analysis. Three techniques were used to determine the area of surface water: Maximum Likelihood Classification (MLC) and the Normalized Difference Water Index (NDWI), Water Pixel extraction and Pixel counting. When it came to defining the water surface, NDWI in conjunction with water pixel extraction outperformed MLC. Water Pixel extraction and Pixel counting method gives precise results of surface water area with landsat-8 images.

Keywords: Remote Sensing, Surface Water, NDWI, GIS, Jayakwadi Dam.

1. Introduction:

Life support, ecological maintenance, and the facilitation of social and economic advancement all depend on water. It is an essential resource for power generation, industry, drinking, agriculture, and sanitation. A fundamental human right and an essential element of sustainable development, according to the UN, is access to clean water [1]. Additionally, freshwater is essential for preserving ecological balance and biodiversity in natural settings [2]. Water is essential for irrigation in agriculture, which helps provide food for the world's expanding population [3]. Water resources are also essential for hydrological cycles, disaster risk reduction, and climate regulation.

The strain on freshwater systems has increased due to urbanization, climate change, and population expansion, making effective management of water resources more crucial than ever [4]. Water is primarily stored in reservoirs, which are open-air storage structures—typically constructed using masonry or earthworks—designed to collect and hold water in large quantities for various uses. Reservoirs are usually created by building dams across rivers to impound the flow of water for future consumption [5].

Conventional water monitoring techniques, including field surveys and manual measurements, while reliable, tend to be time-intensive, require significant labor, and provide limited spatial coverage [6]. Alternatively, Remote Sensing (RS) and Geographic Information System (GIS) technologies present efficient, accurate, and economical methods for monitoring water bodies on a larger scale. These technologies enable the observation of surface water dynamics over time, facilitate the analysis of seasonal variations, and support informed decision-making in water resource management.

In recent years, Remote Sensing (RS) and Geographic Information System (GIS) techniques have been widely utilized in hydrological research for various applications, including flood risk assessment, watershed management, and urban planning [7]. For example, studies in Iraq have employed these technologies to evaluate the impacts of urbanization on water resources, providing valuable insights for sustainable development planning. Likewise, remote sensing has proven instrumental in identifying potential rainwater harvesting zones, thereby supporting water conservation initiatives.

2. Literature Review:

Kshirsagar et al. [8] highlighted the significance of monitoring the surface water area of the Jayakwadi Dam, which was constructed in 1976 and plays a vital role in supplying drinking water, supporting industrial activities, and providing irrigation. The surface water extent of the dam can be effectively estimated using satellite imagery, remote sensing, and GIS techniques. This study utilized multispectral data from the Landsat-8 satellite, which has a spatial resolution of 30 meters, focusing on data collected between 2014 and 2022. The analysis applied both the Normalized Difference Water Index (NDWI) and Maximum Likelihood Classification (MLC) methods to assess the surface water area. Among the two, NDWI combined with water pixel extraction was found to yield more accurate results. The paper presents a comparative evaluation of these two methods using satellite data to estimate the dam's water surface area.

Kandekar et al. [12] used Google Earth Engine and machine learning to extract surface water data from Sentinel-2A imagery, showing increased water spread in 2019 due to rainfall and pumping. This method proved faster and more efficient than traditional techniques. Kshirsagar et al. [9] analyzed water quality using Landsat-8 and Sentinel-2 data from 2016–2023. They used NDWI, NDTI, and NDCI indices to assess turbidity and chlorophyll levels, with good results for water quality monitoring. Foteh et al. [10] evaluated sedimentation in the dam using Landsat 8 data and found a 10.53% reduction in storage capacity over 41 years. They also developed a revised elevation-capacity curve using the SWAT model. Sanyal et al. [11] improved storage capacity estimation by combining optical and radar imagery, reducing errors caused by cloud cover and limited water level data. Wadghane et al. [12] addressed water scarcity in Maharashtra using the Agricultural Water Poverty Index (AWPI), recommending better infrastructure, efficient irrigation, and increased community participation. Ghosh et al. [13] applied machine learning models (RF, SVM, LR, XGBoost) to identify suitable dam sites in drought-prone regions, with RF showing the best performance. Wagh et al. [14] assessed sedimentation in the Ujjani reservoir, estimating an 11.23% capacity loss. They proposed dredging to restore lost capacity, using MNDWI for water surface estimation. Tripathi et al. [15] explored soil erosion impacts on reservoirs, emphasizing the role of RS in assessing water spread and sediment impact for better reservoir management. Ikhar et al. [16] developed a multi-objective reservoir operation model for Jayakwadi using MATLAB and genetic algorithms, providing flexible management options for irrigation and hydropower needs.

3. Materials and Methods:

3.1 Study Area:



Fig. 1 Study Area

The Jayakwadi Dam, also known as Nathsagar Dam, is located in Paithan Taluka, Chhatrapati Sambhaji Nagar district, Maharashtra. Built between 1965 and 1976, it is one of Asia's largest earthen dams, constructed to address water scarcity in the drought-prone Marathwada region. The dam primarily supports irrigation, allocating around 80% of its water for agriculture, which is vital to the local economy. It also supplies water for domestic (5–7%) and industrial use.

Spanning an area of 350 sq. km, with a height of 40.3 meters and length of 9,998 meters, the dam has a storage capacity of 102.74 TMC and a catchment area of 21,750 sq. km. It receives an average annual rainfall of 726 mm and is equipped with 27 gates for flood control and efficient water management. Beyond its utility, the Jayakwadi Dam plays a key ecological role—supporting biodiversity, wetland habitats, and groundwater recharge—making it crucial for both environmental and socio-economic stability in the region.

3.2 Data Set:

This study uses Landsat-8 satellite imagery to analyze surface water variations of the Jayakwadi Dam over time. The satellite provides multispectral data that is well-suited for hydrological studies and effective in extracting surface water features.

Table.1

Band description of Landsat-8 sensor

Band	Description	Resolution
1	Coastal / Aerosol	30 meters
2	Blue	30 meters
3	Green	30 meters
4	Red	30 meters
5	Near-Infrared (NIR)	30 meters
6	Shortwave Infrared (SWIR-1)	30 meters
7	Shortwave Infrared (SWIR-2)	30 meters
8	Panchromatic	15 meters
9	Cirrus	30 meters
10	Thermal Infrared (TIRS-1)	100 meters
11	Thermal Infrared (TIRS-2)	100 meters

3.3 Methods:

3.3.1) NDWI and Pixel extraction-1(Method-1): The Normalized Difference Water Index (NDWI) is a widely used remote sensing index developed by McFeeters (1996) to enhance the detection of water bodies in satellite imagery. NDWI is particularly effective in distinguishing water features from surrounding land and vegetation by exploiting the spectral reflectance characteristics of water in the green and near-infrared (NIR) bands.

Step 1: Choose the Landsat 8 image's Bands 3 and 5.
Step 2: Use Bands 3 and 5 to calculate the NDWI.
Step 3: Use attributes to extract the NDWI resulting image
Step 4: Reclassify the extracted image in step four.
Step 5: Use a mask to extract and reclassify the image
Step 6: Determine the Extracted Pixel's Value
Step 7: Surface Area Calculation.

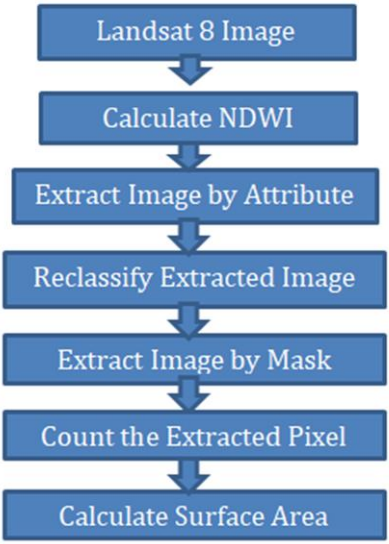


Fig. 2 Steps to calculate Surface water area

This method begins by computing the Normalized Difference Water Index (NDWI) from satellite imagery, using Band 3 (green) and Band 5 (near-infrared). The NDWI is a ratio-based metric that highlights water bodies by comparing these two bands. After generating the NDWI image, only pixels with values greater than one—indicative of water—are extracted based on their attributes. In the next step, the image is reclassified to clearly separate different classes. Using a shapefile of the water reservoir as a mask, the relevant portion of the image is isolated. Finally, the number of extracted water pixels is counted, and the surface area is calculated using the ArcGIS field calculator, based on the image resolution.

3.3.2) Maximum Likelihood Classification(Method-2): Two principles form the foundation of MLC.

1) The distribution of cells in the multiple dimensions is regular for every class sample.

2) Bayes' decision-making theory.

For a pixel with feature vector x\mathbf{x}x, the probability that it belongs to class iii is given by the multivariate normal (Gaussian) probability density function:

$P(x|i)=(2\pi)n/2|\Sigma i|1/21\exp(-21(x-\mu i)T\Sigma i-1(x-\mu i))$

Where:

- x = vector of observed values (e.g., pixel values across spectral bands)
- μi = mean vector of class iii
- Σi= covariance matrix of class iii
- |Σi|| = determinant of the covariance matrix
- n= number of bands (dimensions)

The discriminant function for class iii is:

$gi(x)=lnP(i)-21ln|\Sigma i|-21(x-\mu i)T\Sigma i-1(x-\mu i)$

Where:

- P(i) = prior probability of class iii

Classification Rule: Assign the pixel x to the class iii for which the discriminant function gi(x) is maximum.

$Class(x)=argimax\{gi(x)\}$

Maximum Likelihood Classification (MLC) is a technique that utilizes the mean and covariance of each class signature. A *signature* refers to a group of pixels that share similar characteristics and belong to the same class. In this method, pixels are assigned to a class based on the probability that they belong to it.

The classification process involves calculating the probability of each pixel belonging to each class. Each pixel is then assigned to the class with the highest probability. By default, the classification assumes equal *a priori* probabilities for all classes. However, a custom *a priori* probability file can be used, which assigns different weights to each class based on prior knowledge. These weights are defined in the *a priori* file.

- Class 1 **represents** urban areas **and is shown in** blue**,**
- Class 2 **represents** bare land **and is shown in** pink**,**
- Class 3 **represents** vegetation **and is shown in** green**,**
- Class 4 represents water bodies and is shown in red.

3.3.3) NDWI and Pixel extraction-2(Method-3): In this proposed method the NDWI calculate from green and NIR band and extract water pixels by using the attribute i.e. the pixel those value is 1 or indicate water. In the next step extract the pixels with the shape file, it select water pixels which is present in the study area. Finally extracted pixel's count and calculate the surface water area as shown below.

Step 1: Choose the Landsat 8 image's Bands 3 and 5.

Step 2: Use Bands 3 and 5 to calculate the NDWI.

Step 3: Use attributes to extract the NDWI resulting image

Step 4: Extract the pixels according study area shape file.

Step 5: Count Extracted Pixel's & calculate Surface Water Area.

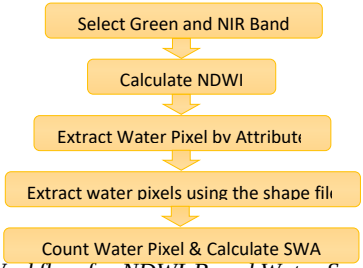


Fig. 3 Workflow for NDWI-Based Water Surface Area

4)Result & Discussion: The highly absorption show's on water body. So water body easily can be map with the help of Normalized water index. The below images shows the steps to find out the Surface water area as per the Method-1. This operation is perform with the help of ArcMAP.

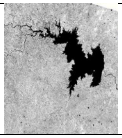
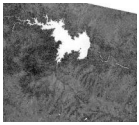
				
Step1:Band Image of Green & NIR	Step2:NDWI Calculated	Step3:Extract by Attribute	Step4:Rec sifyed Ima	Step5: Resultant Image

Fig 4. Steps to Calculate surface water area

In resultant image of fig.5:6-Nov-2019 shows 367041 pixels and 330.3369 square kilometre water surface area.

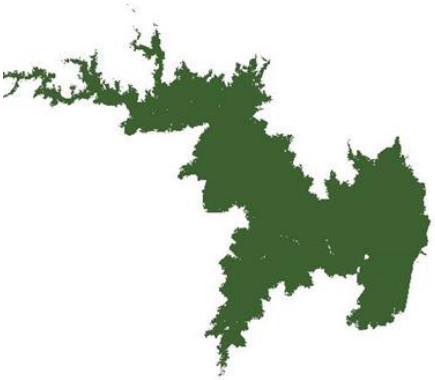


Fig.5: 06-Nov-2019

As shown in step1 of fig.6 Water pixels can be identified using the Maximum Likelihood Classification (MLC) method-2. To begin, we create a layer stack from satellite imagery using Band 2, Band 3, and Band 4. We then define representative training samples for four distinct land cover classes: Urban, Bare Land, Vegetation, and Water. For each class, we select a minimum of 15 sample pixels from the satellite image. These samples are used as training data for the MLC algorithm, which

classifies the entire image based on the statistical characteristics of the selected classes. . The total 373133 water pixels i.e. 335.8797 KM2 surface area is shown. The landsat-8 satellite image were used for maximum likelihood classification. The landsat-8 satellite image has resolution of 30 meter.

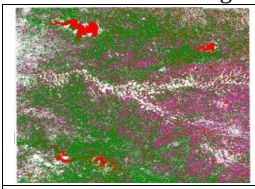
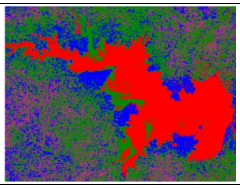
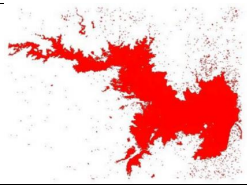
		
Step 1: Maximum likelihood classification of 6 Nov 2019	Step 2: Clipped accordin to Study Area from Maximum Likelihood classification	Step 3: Water Pixel extracted according to Stu Area from Maximum Likelihood classificatic

Fig 6 Steps To calculate SWA by MLC

Method-3 implemented on the basis of open source platform python and python library like tkinter, rasterio, numpy. With the help of method 3 we calculate surface water area fast. In the method-3 the reclassification of NDWI image is reduce so the execution time is decreases and no need to perform manual steps to calculate SWA.

5) Conclusion:

Water is a critical resource for urban planning and development, making it essential to accurately estimate the amount of water present in reservoirs and other water bodies. While the surface area of a water reservoir can be determined from satellite imagery, this study applies two methods to the same dataset for comparison. The first method involves calculating the Normalized Difference Water Index (NDWI) to extract water bodies. The second method uses image classification to identify water pixels across the satellite image. Additionally, a third method was implemented in Python to automate the process, reducing execution time and eliminating manual, time-consuming steps.The classification method identifies water pixels across the entire satellite image, covering all water bodies in the study area. In contrast, the NDWI method, combined with a shapefile, isolates water pixels specifically within the reservoir boundary. Based on the results, it is evident that the NDWI approach, when integrated with the custom Python tool, provides more accurate and efficient result as compared to manual classification techniques.

REFERENCES:

1. UN-Water. (2021). *Summary Progress Update 2021 – SDG 6 – water and sanitation for all*. https://www.unwater.org/

2. WWF. (2020). *Living Planet Report 2020*. https://www.wwf.org/

3. FAO. (2017). *The Future of Food and Agriculture – Trends and Challenges*. http://www.fao.org/

4. IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. https://www.ipcc.ch/

5. “Reservoir | water storage,” Encyclopedia Britannica. https://www.britannica.com/technology/reservoir Accessed on 13/5/2025.

6. Foteh, R., Garg, V., Nikam, B. R., Khadatare, M. Y., Aggarwal, S. P., & Kumar, A. S. (2018). Reservoir sedimentation assessment through remote sensing and hydrological modelling. Journal of the indian Society of Remote sensing, 46(11), 1893-1905.

7. Ghosh, A., & Bera, B. (2024). Identification of potential dam sites for severe water crisis management in semi-arid fluoride contaminated region, India. Cleaner Water, 1, 100011.

8. Kshirsagar, A., & Deshmukh, R. R. (2023). Surface Water Area Detection And Extraction By Using Different Techniques Of Remote Sensing And GIS. Journal of Survey in Fisheries Sciences, 10(1), 16449-16455.

9. Kshirsagar, A., Deshmukh, R. R., & Gupta, R. WATER QUALITY ESTIMATION OF JAYAKWADI DAM BY USING REMOTE SENSING AND GIS TECHNIQUES.

10. Foteh, R., Garg, V., Nikam, B. R., Khadatare, M. Y., Aggarwal, S. P., & Kumar, A. S. (2018). Reservoir sedimentation assessment through remote sensing and hydrological modelling. Journal of the indian Society of Remote sensing, 46(11), 1893-1905.

11. Sanyal, J., & Chowdhury, A. (2023). Reassessment of reservoir sedimentation rates under a monsoon climate with combined optical and microwave remote sensing: a case study of three reservoirs in the Upper Godavari Basin, India. Journal of Hydrologic Engineering, 28(11), 05023022.

12. Wadghane, R. H., & Madguni, O. (2023). Agriculture water poverty status of sugarcane cultivation along canals of Jayakwadi Dam, Maharashtra, India. Smart Agricultural Technology, 6, 100369.

13. Ghosh, A., & Bera, B. (2024). Identification of potential dam sites for severe water crisis management in semi-arid fluoride contaminated region, India. Cleaner Water, 1, 100011.

14. Wagh, S., & Manekar, V. (2021). Assessment of reservoir sedimentation using satellite remote sensing technique (SRS). Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 102(3), 851-860.

15. Tripathi, A., Langhi, M., Shukla, B. K., Kumar, A., & Bharti, G. (2023, September). Assessment of sedimentation rate in Sipu reservoir using remote sensing & GIS technique. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2800, No. 1). AIP Publishing.

16. Ikhar, P. R., Regulwar, D. G., & Kamodkar, R. U. (2018). Optimal reservoir operation using soil and water assessment tool and genetic algorithm. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 24(2), 249-257.

Author Profile:

Akshay V Ksirsagar is currently pursuing the Ph.D. degree in Computer Science and Information Technology from Department of Computer Science and IT, Dr. Babasaheb Ambedkar Marathwada University, Chhatrapati Sambhajinagar, Maharashtra, India. He is currently working as Mahajyoti Fellow and it is sponsored

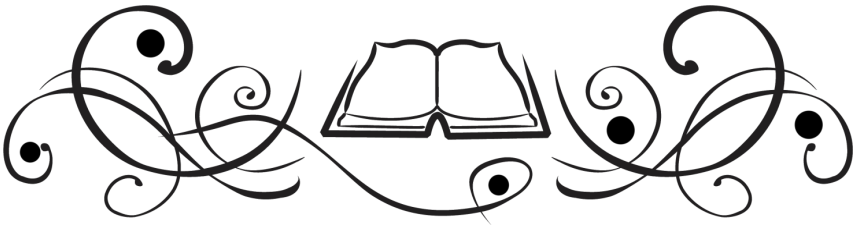
and managed by the Government of Maharashtra. His research interest includes the Machine Learning, Remote Sensing and Geographical Information System (GIS) Technology. He can be reached at akshay.8kshirsagar@gmail.com

Professor (Dr.) R. R. Deshmukh, M.E., M.Sc. (CSE) Ph.D. FIETE, PEIN Fellow, Working As Director/Principal, ICEEM, Waluj and Adjunct Professor, Department of CSIT, Dr. B.A.M. University, Aurangabad, (MS), India. Coordinator of DST-FIST program, University Coordinator of RGSTC Commission, Marathi Viswakosh Dnyanmandal, MHRD GIAN program, Governing Council Member of IETE, New Delhi, Chairman, IETE Aurangabad Centre 2014–2018, Organized Zonal ISF-2016, Sectional President, ICT Section ISCA-2019, Life member ISCA, CSI, ISTE, IEEE, IAEng, CSTA, IDES, ACEE. Management Council, Senate, Academic Council Member at University, He Published 10 Patents and 14 Copyrights, Edited 15 books, Published more than 280 research papers in reputed Journals, Editor-In-Chief, CSI Journal of Computing. Visited Russia, USA, China, Spain, Philippines, Uzbekistan, Thailand for academic work. He can be reached at rrdeshmukh.csit@bamu.ac.in

Ankush S. Chavan is currently pursuing the Ph.D. degree in Computer Science and Information Technology from Department of Computer Science and IT, Dr. Babasaheb Ambedkar Marathwada University, Chhatrapati Sambhajinagar, and Maharashtra, India. His research interest includes the Natural Language Processing, Remote Sensing and Geographical Information System (GIS) Technology. He can be reached at ankushchavan0411@gmail.com

Rohit S. Gupta is currently pursuing the Ph.D. degree in Computer Science and Information Technology from Department of Computer Science and IT, Dr. Babasaheb Ambedkar Marathwada University, Chhatrapati Sambhajinagar, Maharashtra, India. He is currently working as DST-Inspire Fellow and it is sponsored and managed by the Department of Science & Technology, Government of India. His research interest includes the Image Processing System, Remote Sensing and Geographical Information System (GIS) Technology. He can be reached at rohitgupta8844@gmail.com

Секция
Методы, системы и средства обработки и моделирования физических сигналов, полей и процессов



УДК 536.712

Арзуманян Грайр Вагаршакович
Юрченко Андрей Дмитриевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СЖАТИЯ ВОЗДУХА

Целью работы была экспериментальная проверка закона Бойля-Мариотта, закона взаимосвязи между давлением и объёмом воздуха постоянной массы при медленном изменении его объёма при условиях, близких к нормальным условиям. Для достижения поставленной цели необходимо было спроектировать экспериментальную установку, собрать ее, а также разработать методику проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных. Полученные результаты квазиравновесного процесса изотермического сжатия воздуха подтверждают закон Бойля-Мариотта. Отношение минимального значения произведения давления газа на его объем к максимальному значению в эксперименте равен 0,9957.

Воздух, идеальный газ, давление воздуха, объём воздуха, изотермический процесс, манометр, рабочий цилиндр, высота воздушного столба, лабораторная установка.

Arzumanyan Hrayr Vagharshakovich
Yurchenko Andrey Dmitrievich

INVESTIGATION OF THE ISOTHERMAL PROCESS AIR COMPRESSION

The aim of the work was to experimentally verify the Boyle-Marriott law, the law of the relationship between pressure and volume of air of constant mass with a slow change in its volume under conditions close to normal conditions. To achieve this goal, it was necessary to design an experimental setup, assemble it, and develop a methodology for conducting the experiment and processing experimental data. The obtained results of the quasi-equilibrium process of isothermal air compression confirm the Boyle-Marriott law. The ratio of the minimum value of the product of the gas pressure by its volume to the maximum value in the experiment is 0.9957.

Air, ideal gas, air pressure, air volume, isothermal process, pressure gauge, working cylinder, air column height, laboratory installation.

Введение

При изучении некоторых термодинамических процессов в реальных экспериментах осуществляется квазиравновесный (квазистатический) процесс, состоящий из последовательности малых неравновесных процессов, каждый из которых лишь допустимо мало нарушает состояние равновесия системы [1-3].

В настоящей работе приведены результаты исследования квазиравновесного процесса изотермического ($\nu = const$, $dT = 0$) сжатия атмосферного воздуха при условиях близких к нормальным условиям. Уравнение такого

процесса для идеального газа имеет вид (закон Бойля–Мариотта):

$$pV = const.$$

Целью настоящего исследования является экспериментальная проверка этого закона.

Схема экспериментальной установки

Для достижения поставленной цели, на начальном этапе исследования был проведен анализ технических способов изменения объема воздуха в ограниченном объеме. На основе этого был сделан выбор схемы будущей установки. В ней рабочим элементом является подвижный поршень, находящийся внутри пластикового корпуса.

Схема искомой экспериментальной установки приведена на рис. 1. Она состоит из закрытого пластикового корпуса 1. В ней установлен рабочий элемент установки – пластиковый цилиндр 2 с подвижным поршнем 3. Рабочий объем воздуха 4 соединен с манометром 5 и выпускным клапаном 7 трубкой-переходником 6.

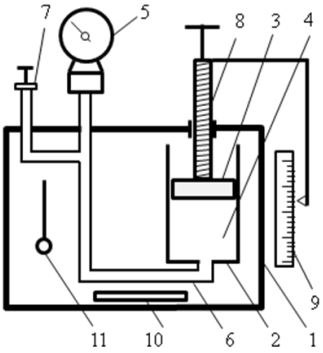


Рис. 1. Схема экспериментальной установки



Рис. 2. Экспериментальная установка

Изучение изотермического процесса сжатия воздуха осуществляется при помощи вращения винта 8, приводящего к изменению положения поршня 3 внутри рабочего цилиндра. Положение поршня фиксируется с помощью линейки 9. Измеряя давление манометром 5, соответствующее различным объемам, можно проверить справедливость закона Бойля-Мариотта при комнатной температуре. Для проведения исследований при температуре выше комнатной можно в пластиковый корпус 1 налить воду и с помощью нагревательного элемента 10 нагреть ее до заданной температуры, которая регистрируется с помощью термодатчика 11. Собранная искомая экспериментальная установка приведена на рис. 2.

Результаты эксперимента

Если предположить, что при изотермическом сжатии воздуха площадь поперечного сечения

внутренней полости цилиндра 2 постоянна, то объём воздуха в нем будет пропорционален длине воздушного столба ($V \sim L$). Следовательно, для такого процесса выполняется равенство:

$$p_1 L_1 = p_i L_i,$$

где (p_1, L_1) и (p_i, L_i) – давление и длина воздуха в трубке в начале и в произвольной i-й точке изотермического процесса сжатия соответственно.

В экспериментальной установке точность манометра выше, чем у линейки. Поэтому было принято решение измерять манометрическое давление p_{0i} в рабочем объеме воздуха при фиксированных значениях высоты L_i поршня. Результаты четырех серий таких измерений приведены в табл. 1.

Далее определялись средние значения манометрического давления $<p_{0i}>$. Истинные значения давления определялись из соотношения $<p_i> = p_0 + <p_{0i}>$, где p_0 – атмосферное давление в аудитории. Эксперимент проводился при p_0 = 763 мм.рт.ст и температуре 22 °С.

Проведенные эксперименты показывают, что произведение давления воздуха в цилиндре на высоту поршня не остается постоянным (см. табл. 1). Это прежде всего, связано с тем, что в этих расчетах не учитывался воздух в трубке-переходнике 6, соединяющий рабочий объем воздуха 4 с манометром 5 и с клапаном 7.

Таблица 1

Результаты прямых измерений и их первичная обработка

N	L_i, мм	p_{0i}, мм рт. ст.				$<p_{0i}>$, мм рт.ст.	$<p_i>$, мм рт.ст.	$<p_i> \cdot L_i$, мм рт.ст.·мм
		1 серия	2 серия	3 серия	4 серия			
1	120	24	23	24	23	23,5	786,5	94380
2	118	34	35	37	36	35,5	799,25	94341
3	116	42	46	46	50	46	809	93844
4	114	58	61	60	61	60	823	93822
5	112	69	74	70	75	72	835	93520
6	110	83	85	86	88	85,5	848,5	93335
7	108	96	104	102	104	101,5	864,5	93366
8	106	116	115	114	115	115	878	93068
9	104	128	132	132	134	131,5	894,5	93028
10	102	148	148	144	144	146	909	92718
11	100	166	164	164	162	164	927	92700
12	98	178	184	180	182	181	944	92512
13	96	194	200	196	200	197,5	960,5	92208
14	94	218	221	218	219	219	982	92308
15	92	234	236	234	238	235,5	998,5	91862
16	90	256	258	257	256	256,75	1019,75	91778
17	88	278	278	280	276	278	1041	91608
18	86	298	302	301	299	300	1063	91418

Искомый поправочный коэффициент x высоты поршня был определен из

уравнения:

$$p_i(L_i + x) = p_j(L_j + x),$$

где (p_i, L_i) и (p_j, L_j) – давление и длина воздуха в трубке в i-ой и j-ой точке изотермического процесса сжатия.

Коэффициент x был определен для пяти различных пар значений давлений воздуха и соответствующим им высот поршня. Среднее его значение, после округления до целого значения, получилось равным $\langle x \rangle = 11$ мм.

В табл. 2 приведены результаты измерений с учетом поправки $\langle x \rangle$ на высоту поршня: $L'_i = L_i + \langle x \rangle$. В этой таблице через φ_i обозначено произведение давления воздуха $\langle p_i \rangle$ на высоту поршня L'_i ($\varphi_i = \langle p_i \rangle \cdot L'_i$).

Таблица 2.

Результаты измерений с учетом поправки x на высоту поршня				
N	L'_i, мм	$\langle p_i \rangle$, мм рт.ст.	φ_i, мм рт.ст.·мм	$\langle \varphi \rangle$
1	131	786,5	103032	102884 мм рт. ст.
2	129	798,5	103007	
3	127	809	102743	
4	125	823	102875	
5	123	835	102705	
6	121	848,5	102669	
7	119	864,5	102877	
8	117	878	102726	
9	115	894,5	102868	
10	113	909	102717	
11	111	927	102897	
12	109	944	102896	
13	107	960,5	102774	
14	105	982	103110	
15	103	998,5	102846	
16	101	1019,75	102994	
17	99	1041	103059	
18	97	1063	103111	

Среднее значение φ в нашем эксперименте равен $\langle \varphi \rangle$ = 102884 мм рт.ст., φ_{max} = 103111 мм рт.ст., φ_{min} = 102669 мм рт.ст. Отношение $\langle \varphi \rangle / \varphi_{max}$ = 0,9978, $\langle \varphi \rangle / \varphi_{min}$ = 1,0021, $\varphi_{min}/\varphi_{max}$ = 0,9957.

Эти данные показывают, что данная экспериментальная установка позволяет получать удовлетворительные результаты. Следовательно, ее можно использовать для исследования зависимости давления воздуха от температуры при постоянном объёме (закон Шарля или второй закон Гей-Люссака).

Данные табл. 2. можно использовать для решения следующих задач.

1. Построить график изотермического процесса сжатия воздуха в координатах (p, V) путем проведения «гиперболы» между экспериментальными точками или воспользовавшись методом наименьших квадратов. Второй способ дает возможность определить и погрешности измерений.

2. Построить график изотермического процесса сжатия воздуха в координатах (p, $1/V$) путем проведения прямой между экспериментальными точками или воспользовавшись методом наименьших квадратов. Второй способ дает возможность определить и погрешности измерений.

3. Определить числовое значение универсальной газовой постоянной, предварительно определив тангенс угла наклона прямой процесса в координатах (p, $1/V$).

4. Приблизительно определить работу внешней силы при изотермическом сжатии воздуха и сравнить этот результат с теоретическим значением [2], [3].

5. Приблизительно определить полезную (располагаемую) работу газа при изотермическом сжатии воздуха и сравнить результат с теоретическим значением [1]. В данном процессе она будет отрицательной.

Вывод

Для исследования изотермического процесса сжатия воздуха, была собрана экспериментальная установка, разработана методика проведения эксперимента и обработки результатов измерений. Исследования показали, что отношение минимального значения произведения давления газа на его объем к максимальному значению в эксперименте равно 0,9957, что указывает на возможность получения на этой установке удовлетворительных результатов. Следовательно, ее можно использовать для экспериментальной проверки закона Шарля. С целью приобретения дополнительных навыков и умений, в работе предложены несколько вариантов использования получаемых результатов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вукалович М.П., Новиков И.И.. Техническая термодинамика. М.; «Энергия», 1968 г. – 496 с.

2. Савельев И.В.. Курс общей физики. В 3 томах. Том 1. Механика. Молекулярная физика/ И.В. Савельев. –19-е изд., стер. – С.-Пб.: Лань, 2023. – 436 с.

3. Сивухин Д.В., Общий курс физики: учебное пособие: в 5 томах/ Д.В. Сивухин. – 6-е изд., стер. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2021 – Том 2: Термодинамика и молекулярная физика – 2021. – 544 с.

Авторы: Арзуманян Грайр Вагаршакович, кандидат технических наук, доцент кафедры физико-математических основ инженерного образования Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Чехова 2, 347922, телефон: +7 (8634) 36-04-50, e-mail: info@ictis.sfedu.ru.

Юрченко Андрей Дмитриевич, студент первого курса Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Г», 347922, телефон: +7 (8634) 37-16-34, e-mail: irtsu@sfedu.ru.

Author: Arzumanyan Hrayr Vagharshakovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Physical and Mathematical Foundations of Engineering Education at the Institute of Computer Technology and Information Security of the Southern Federal University, 347922 Chekhov Street, Taganrog, Russia, phone: +7 (8634) 36-04-50, E-mail: info@ictis.sfedu.ru .

Yurchenko Andrey Dmitrievich, first-year student at the Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, Taganrog, Russia.Nekrasovsky 44, building "G", 347922, phone: +7 (8634) 37-16-34, e-mail: irtsu@sfedu.ru.

УДК 621.548:621.31:004.94

Кулявец Вячеслав Олегович
Москалёв Эдуард Константинович

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЁХЛОПАСТНОГО РОТОРА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ «ENGEE»

Исследование посвящено численному моделированию характеристик ветроколеса, которое является основным элементом маломощной горизонтально-осевой ветроустановки. В работе обосновывается важность исследования и настройки работы системы при различных значениях скорости ветра. С помощью среды моделирования «Engee» получена модель турбины, использующая стандартные возможности библиотек он-лайн платформы.

В ходе работы была разработана и создана модель ветрогенератора. Основная цель работы – составить визуальную схемную модель установки, чтобы исследовать зависимости и основные рабочие параметры турбины.

В работе затронуты экологические аспекты, ввиду увеличения значимости темы уменьшения использования природных невозобновляемых ресурсов и важности задачи уменьшения вредных выбросов.

Введение

Возобновляемые природные ресурсы хоть и имеют множество плюсов, связанных с их относительной безграничностью и экономической составляющей, однако не стоит забывать про их главный недостаток – сложность выбора место установки в связи с кардинально разными природными особенностями различных регионов. Для решения этого вопроса и было принято решение создать, а в будущем и адаптировать к конкретному применению в проекте реальной установки модель в Engee [1] – [2].

Основная часть

Энергия ветра, направленная в сторону ветроколеса, действует на него, далее, полученная кинетическая энергия преобразовывается в механическую, благодаря чему крутится вал, находящийся на генераторе, и вырабатывает электроэнергию [3] – [4].

Расчёты для дальнейшего снятия зависимостей работы ветроколеса:

Кинетическая энергия движения воздуха:

$$E = \frac{m \cdot V^2}{2}, \text{Дж}.$$

Изменим формулу выше, учитывая расход воздуха:

$$M = \rho \cdot V \cdot F, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Выведем формулу для расчёта мощности воздушного потока, используя предыдущие формулы:

$$P = \frac{\rho \cdot V^3 \cdot F}{2}, \text{Вт.}$$

Известно, что в процессе взаимодействия лопастей с воздушным потоком ветроколесо получает не всю энергию. В связи с чем, добавим $C_\text{р}$ – коэффициент мощности:

$$P = C_\text{р} \cdot (\rho \cdot V^3 \cdot F)/2, \text{Вт.}$$

Площадь сечения ветроколеса:

$$P = C_\text{р} \cdot (\rho \cdot \pi \cdot V^3 \cdot R^2)/2, \text{Вт.}$$

Формульное значение коэффициента мощности:

$$C_\text{р} = 4 \cdot a(1 - a^2).$$

Тогда коэффициент торможения потока принимает вид:

$$a = \frac{V - V'}{V} = \frac{V - V''}{2V};$$

где V– прямолинейная скорость потока, V', – потока воздуха на лопастях, м/с V''- скорость потока, обтекающая за ветроколесом, м/с.

Примерные показания $C_\text{р}$ принимают значения от 0,4 до 0,5 [4] – [5]. Преобразовывая скорость воздушного потока у лопастей к скорости ветра, получаем соотношение [4]:

$$Z = \frac{\omega \cdot R}{V},$$

где ω – угловая скорость, рад/с.

Ветряные генераторы обычно оснащаются трехлопастными турбинами, которые считаются наиболее эффективными. Они используются в 75% ветряных турбин, находящихся в эксплуатации.

Для оценки эффективности ветряной турбины используется параметр, называемый «крутящий момент на валу». Он определяется по следующей формуле:

$$M = P/\omega = (C_\text{р} \cdot F \cdot \rho \cdot \text{V}^3 \cdot R)/2ZV, \text{Н} \cdot \text{м}$$

Для дальнейших вычислений добавим $C_\text{м}$ – коэффициент крутящего момента:

$$C_\text{м} = \frac{C_\text{р}}{Z}$$

Сгруппировав формулы выше, получим расчётную формулу момента на валу турбины:

$$M = C_\text{м} \frac{\pi \cdot \rho \cdot \text{V}^2 \cdot R^3}{2}, \text{Н} \cdot \text{м}$$

На рис. 1 можно увидеть общую схему модели трёхлопастного ротора ветрогенератора, полученную в программной оболочка для инженерных расчетов – «Engee». На рисунке можно увидеть общий вид блоков, в которых заданы начальные значения (полученные на основании данных по региону или местности).

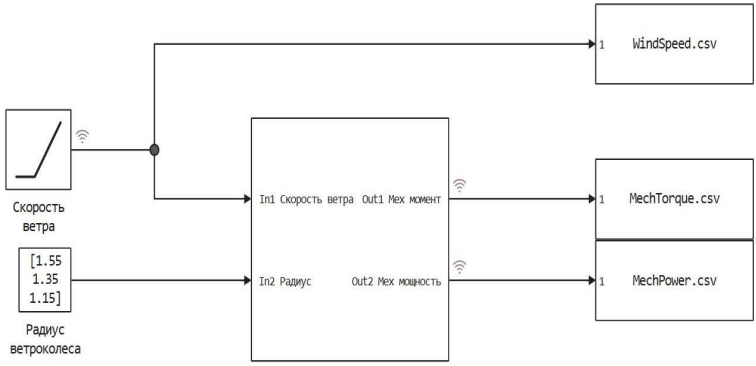


Рис. 1 Основная схемная модель трёхлопастного ротора ветрогенератора

Далее на рис. 2 раскрыто содержимое основного блока, определяемое приведенными ранее аналитическими зависимостями. Основные вычисляемые параметры: механическая мощность и крутящий момент на валу турбины [5].

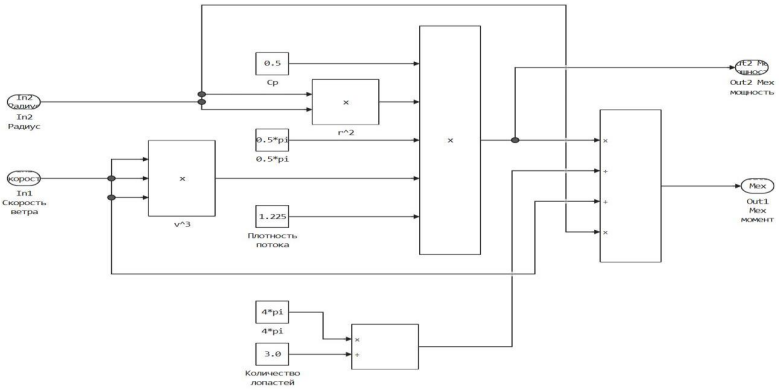


Рис. 2 Вычислительные алгоритмы основного блока схемы

На третьем рисунке, показаны расчётные показания мощности и момента ветрогенератора при различных параметрах диаметра ветроколеса. Были взяты значения диаметров: 1.55, 1.35, 1.15 метров. С помощью графиков можно установить зависимость, насколько эффективно будет увеличиваться механические мощность и момент, при увеличении диаметра ветроколеса ($V = const$ в каждой точке) [6] – [10].

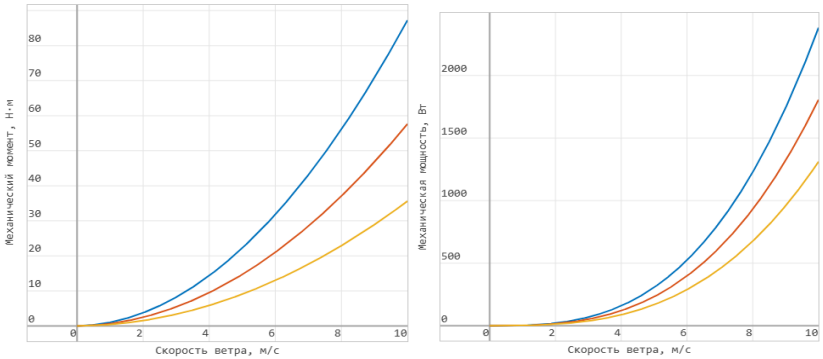


Рис. 3 Графики зависимости механической мощности и момента ветроколеса от скорости ветра при различных его диаметрах

Выводы

В ходе работы были получены формулы для расчёта различных характеристик, снимаемых с ветроколеса, смоделирована наглядная схема работы установки в комплексе динамического моделирования «Engee», выведены графики, с помощью которых можно рассчитать количество вырабатываемой электроэнергии в процессе работы ротора ветрогенератора, в зависимости от его диаметра. Полученная модель может быть использована при создании проекта реальной установки горизонтально-осевого ветрогенератора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Елистратов В.В., Кузнецов М.В., Лыков С.Е. Ветроэнергоустановки. Автономные ветроустановки и комплексы: учебное пособие. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", 2008. – 100 с. – EDN RXWBVZ

2. Гисцов В.Г., Волощенко Ю.П. Расчет и выбор электрооборудования ветроэнергетической установки малой мощности для электроснабжения жилого загородного дома // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2021): материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 2 т. – Таганрог: Издательство ЮФУ, 2021. – С. 49-56. – EDN TOAVVU

3. Канов Л.Н. Схемное моделирование ветроэлектрических установок в системе распределенного электроснабжения // Синтез, анализ и диагностика электронных цепей: Международный сборник научных трудов. Том Выпуск 14. – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2017. – С. 117-125. – EDN YWLKUE

4. Гавриленко В.В. Выбор проектных параметров ветроколеса ветроэнергетической установки. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. – 128 с. – EDN QMIPRB

5. Батагов К.А., Гисцов В.Г., Волощенко Ю.П. Исследование характеристик модели автономной электрической системы с маломощной ветроэнергетической установкой // Проблемы современной системотехники: сборник научных статей. Том Выпуск XIV. – Таганрог: ИП Ступин С.А, 2020. - вып.XIV. С.63-69. – EDN: KYGEAE

6. Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. Основы теории одномерной нелинейной электрической и электронной волновой цепи: учебное пособие.– Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2015. – 100 с. – EDN: VGYXNH

7. Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. Моделирование нелинейных электрических процессов в элементах электронной волновой цепи: учебное пособие.– Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2018. – 116 с. – EDN: YTPEQH

8. Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. Моделирование электронных компонентов интегральных схем методами теории электрических цепей. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2017. – 111 с. – EDN: YHOZPL

9. Волощенко П.Ю., Волощенко Ю.П. Моделирование и исследование источника электрической энергии на фотоэлектронных модулях с преобразователем и нагрузкой // Современные информационные технологии: тенденции и перспективы развития: Материалы XXX научной конференции. – Ростов-на-Дону: Издательство ЮФУ, 2023. – С. 74-77. – EDN WGUBPS

10. Волощенко Ю.П., Волощенко П.Ю. Нелинейные электрические колебания в электронной цепи учебное пособие.– Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство ЮФУ, 2020. 106 с. – EDN: WKEECE

Автор: Кулявец Вячеслав Олегович, студент группы РТбо3-32, кафедра электротехники и мехатроники, Южный федеральный университет, 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371694; email: kuliavets@sfedu.ru.

Author: Kuljavec Vjacheslav Olegovich, student gr. RTbo3-32, Department of Electrical Engineering and Mechatronics, Southern Federal University, 44, Nekrasovskiy street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; e-mail: kuliavets@sfedu.ru.

Автор: Москалёв Эдуард Константинович, студент группы РТбо3-32, кафедра электротехники и мехатроники, Южный федеральный университет, 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371694; email: emos@sfedu.ru.

Author: Moskaljov Jeduard Konstantinovich, student gr. RTbo3-32, Department of Electrical Engineering and Mechatronics, Southern Federal University, 44, Nekrasovskiy street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; e-mail: emos@sfedu.ru.

УДК 629.016

Майдаченко Владислав Владиславович

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ

В статье рассматриваются расчет электропривода и имитационное моделирование динамики городского электромобиля в программном обеспечении MATLAB. В ходе которого были получены и проанализированы графики скоростных и энергетических характеристик.

Электромобиль, сити-кар, городской транспорт, MATLAB, имитационное моделирование, скоростная характеристика, электропривод, транспортная система.

Maidachenko Vladislav Vladislavovich

CALCULATION OF THE ELECTRIC DRIVE OF AN URBAN ELECTRIC VEHICLE AND SIMULATION OF MOTION DYNAMICS

The article discusses the calculation of an electric vehicle's drive and the simulation of its dynamics using MATLAB software. As part of this process, graphs of speed and energy characteristics were generated and analyzed.

Electric vehicle, urban transport, MATLAB, mathematical modeling, high-speed analytic, electric drive, transport system.

Введение

Микроэлектромобиль — это компактное транспортное средство с электрической силовой установкой, предназначенное для перевозки 1–2 человек и обладающее ограниченной скоростью и запасом хода. В России не имеют отдельного определение и приравниваются согласно техрегламенту ТР ТС 018/2011 к категориям L6e (легкие квадрициклы), L7e (тяжелые квадрициклы) или M (мопед).

Проектирование микроэлектромобиля – это сложная инженерная задача. Главная сложность заключается в компактном кузове, который накладывает ограничения на объем запасаемой энергии, и в последствии на запас хода и развиваемую мощность. Основная цель — найти оптимальное решение, которое позволит электромобилю быть одновременно экономичным, динамичным и хорошо управляемым в условиях городской среды, включая дороги с некачественным покрытием. Разработка таких автомобилей требует внимательного подхода к созданию трансмиссии, шасси и системы управления, учитывая все эти взаимосвязанные факторы.

Основная часть

Рассмотрев существующие на рынке микромобилей предложения, я выделил наиболее примечательные для анализа модели, их основные характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики микроэлектромобилей

Модель	Citroën Ami	Renault Twizy	Electra Meccanica Solo
Тип двигателя	iBGS*	Асинхронный	PMSM**
Мощность, кВт	6	4 или 13	40
Тип батареи	Li-ion	Li-ion	Li-ion
Емкость, кВт*ч	5,5 (48 В)	6,1 (48 В)	19,4 (144 В)
Максимальная скорость, км/ч	45	45	129
Запас хода, км	160	100	161
Масса, кг	485	450	590
Цена, $	от 9 000	от 13 600	от 18 750

iBGS - ременной стартер-генератор*
*PMSM**- синхронный двигатель с постоянными магнитами*



Рис. 1 Citroën Ami



Рис. 2 Renault Twizy



Рис. 3 ElectraMeccanica Solo

Citroën Ami

- Плюсы: дешевый ($9 000) и обладает хорошим запасом хода (160 км).
- Минусы: примитивный двигатель (iBGS), тяжелее Twizy.

Renault Twizy

- Плюсы: лёгкий (450 кг), современный двигатель (PMSM).
- Минусы: малый запас хода (100 км), дорогой ($13 600).

ElectraMeccanica Solo

- Плюсы: лучший запас хода (161 км)
- Минусы: очень дорогой ($18 750), тяжёлый (590 кг).

На основании характеристик серийных моделей зададим необходимые требования к проектируемому электромобилю. Основная цель работы - разработка методики расчета минимально необходимой мощности двигателя для обеспечения:

- максимальной скорости (не менее 90 км/ч);
- преодоления подъемов (до 20% при полной загрузке);
- устойчивого движения на мокром/грунтовом покрытии;
- целевого запаса хода (не менее 100 км в городском цикле);
- возможностей рекуперативного торможения;
- массогабаритных ограничений (масса до 500 кг);

Во время движения на автомобиль действуют 4 основные силы сопротивления [3]: аэродинамическая сила F_w, сила тяжести F_g, сила инерции F_j и сила сопротивлению качению F_r. Для того, чтобы автомобиль начал движение – тяговая сила F_T должна быть больше суммы сил сопротивлений:

$$F_T > F_w + F_g + F_j + F_r \quad (1)$$

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_d \cdot (V + V_w)^2 \quad (2)$$

где $\rho = 1{,}2255\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность воздуха, $A_f = 2\ \text{м}^2$ – лобовая площадь, $A_f = 0{,}4$ – коэффициент лобового сопротивления, $V = 25\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$ – скорость автомобиля, $V_w = 0\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$ - скорость ветра

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (3)$$

где m = 600 кг - полная масса автомобиля, $g = 9{,}8\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, α = 0° – угол наклона поверхности.

$$F_j = m \cdot a \cdot \sigma \quad (4)$$

где $a = 1{,}5\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ – ускорение автомобиля, $\sigma = 1.05$ – коэффициент вращающихся масс.

$$F_r = m \cdot g \cdot f_r \quad (5)$$

где $f_r = 0.013$ – коэффициент сопротивлению качению на асфальте

Найду сумму сил всех сопротивлений:

$$\sum F_R = 383\ \text{Н} + 0\ \text{Н} + 945\ \text{Н} + 77\ \text{Н} = 1405\ \text{Н} \quad (6)$$

Для определения необходимой пиковой мощности воспользуюсь формулой:

$$P_{\text{макс}} = \frac{F_R \cdot V}{\eta_{\text{тр}}} = \frac{1405\ \text{Н} \cdot 25\frac{\text{м}}{\text{с}}}{0{,}85} = 41{,}32\ \text{кВт} \quad (7)$$

где $\eta_{\text{тр}}$ – КПД трансмиссии

Это мощность необходимая для разгона электромобиля до скорости 90 км/ч за 17 секунд. Найду номинальную мощность для поддержания скорости, для этого приму ускорение a = 0, тогда:

$$P_{\text{ном}} = \frac{(F_R - F_r) \cdot V}{\eta_{\text{тр}}} = \frac{460\ \text{Н} \cdot 25\frac{\text{м}}{\text{с}}}{0{,}85} = 11{,}5\ \text{кВт} \quad (8)$$

Как можно заметить – для поддержания скорости требуется примерно в 3,5 раза меньшая мощность.

Найду необходимый момент на колесах для преодоления сил сопротивления, приму радиус колес r = 0,3 м, тогда:

$$\text{М}_{\text{макс}} = \frac{F_R \cdot r}{\eta_{\text{тр}}} = \frac{1405\ \text{Н} \cdot 0{,}3\ \text{м}}{0{,}85} = 496\ \text{Н} \cdot \text{м} \quad (9)$$

$$\text{М}_{\text{ном}} = \frac{(F_R - F_r) \cdot r}{\eta_{\text{тр}}} = \frac{460\ \text{Н} \cdot 0{,}3\ \text{м}}{0{,}85} = 162\ \text{Н} \cdot \text{м} \quad (10)$$

Сведём полученные значения в таблицу 2.

Таблица 2

Параметры рассчитанного электропривода

Параметр	Значение минимальное	Значение выбранное
Пиковая мощность	41,5 кВт	45 кВт
Номинальная мощность	11,5 кВт	15 кВт
Пиковый момент	496 Н · м	500 Н · м
Номинальный момент	162 Н · м	165 Н · м

Для проверки динамики микроэлектромобиля с выбранными характеристиками электропривода промоделируем его в MATLAB.

Таблица 3

Параметры моделирования микроэлектромобиля

Параметр	Значение	Ед. измерения
Масса электромобиля	650	кг
Макс. скорость	90	км/ч
Передаточное соотношение трансмиссии	8,5	-
КПД трансмиссии	0,95	-
Коэффициент сцепления	1,1	-
Радиус колеса	0,33	м
Номинальная мощность электродвигателя	20000	Вт
Пиковая мощность электродвигателя	40000	Вт
Напряжение батареи	144	В
Емкость батареи	10	кВт*ч
Угол наклона	0; 20	град

Результаты моделирования разгона с 0 км/ч и торможения на участках с разным наклоном:

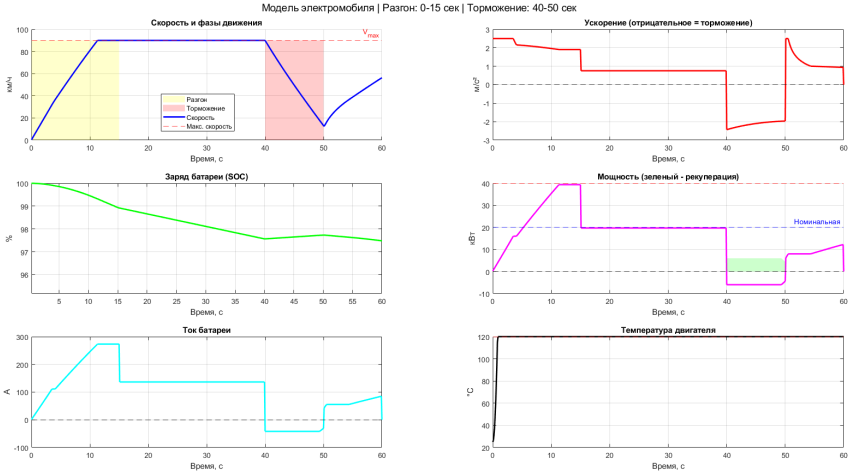


Рис. 4 Графики моделирования движения при угле наклона 0 градусов

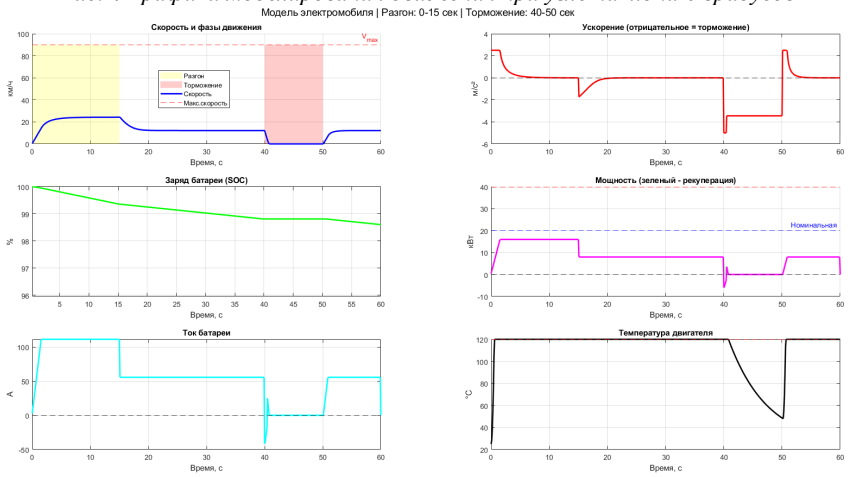


Рис. 5 Графики моделирования движения при угле наклона 20 градусов

Выводы

В рамках данного исследования был выполнен расчет электропривода городского микроэлектромобиля и проведено имитационное моделирование его динамики в программном обеспечении MATLAB. Анализ характеристик уже существующих моделей, таких как Citroën Ami, Renault Twizy и ElectraMeccanica Solo, позволил определить основные требования к проектируемому транспортному средству.

Расчет сил сопротивления помог определить оптимальные параметры электропривода, а моделирование в MATLAB подтвердило, что выбранные характеристики электропривода обеспечивают:

- Устойчивость движения как на горизонтальной поверхности, так и на подъемах до 20%;
- Достижение максимальной скорости 90 км/ч за 12 секунд;
- Эффективное рекуперативное торможение.

Результаты исследования показывают, что можно создать компактный городской электромобиль, который будет сочетать в себе динамичность, энергоэффективность и маневренность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Loek Marquenie. Design of an energy efficient high performance drive train, Master's Thesis, Eindhoven, 2010

2. Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory, and Design, CRC Press LLC, 2005

3. В.Н. Кравец. Теория автомобиля: учебник / В.Н. Кравец; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – 2-е изд., переработ. – Нижний Новгород, 2013. – 413 с.4.

4. International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS) Vol. 12, No. 2, Jun 2021, pp. 637~649

5. Development of driving cycles for electric vehicles in the context of the city of Florence / Berzi, Lorenzo; Delogu, Massimo; Pierini, Marco. - In: TRANSPORTATION RESEARCH. PART D, TRANSPORT AND ENVIRONMENT. - ISSN 1361-9209. - STAMPA. - 47:(2016), pp. 299-322. [10.1016/j.trd.2016.05.010]

6. Энтони Джутон, Ксавье Рейн, Валери Совант-Мойно, Франсуа Орсини, Кристель Сабер, Седдик Бача, Оливье Бету, Эрик Лабуре Электромобиль: устройство, принцип работы, инфраструктура / пер. с франц. В. И. Петровичева. – М.: ДМК Пресс, 2022. – 440 с.: ил.

7. Усольцев А.А. Электрический привод/Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2012, – 238 с.

8. https://ev-database.org/ (дата обращения 20.05.2024 г.)

9. https://www.evspecifications.com (дата обращения 20.05.2024 г.)

10. https://habr.com/ru/articles/882696/ (дата обращения 20.05.2024 г.)

Автор: Майдаченко Владислав Владиславович, студент, Южного федерального университета, ИРТСУ, Россия, город Таганрог, телефон: +7(928)136-22-17, email: maidachenko@sfedu.ru.

Author: Maidachenko Vladislav Vladislavovich, student, Southern Federal University, IRTSU, Russia, Taganrog, phone: +7(928)136-22-17, email: maidachenko@sfedu.ru.

УДК 004.383.3

Калюжная Софья Евгеньевна, Никитин Евгений Павлович,
Галова Мария Константиновна

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В GNU RADIO

В рамках исследования был проведен анализ преобразования Гильберта. С помощью данной операции был выполнен важный этап обработки входных сигналов в программном инструментарии GNU Radio, в дальнейших проектах это понадобится для реализации радиопеленгационных систем точного определения местоположения и слежения за движущимися объектами, осуществляющими передачу сигналов. Полученные результаты способствуют формированию теоретической и практической базы для создания высокоточных радиосистем.

Ключевые слова: преобразование Гильберта, GNU Radio, обработка сигналов, радиосистема

Kaliuzhnaya Sophia Evgenevna, Nikitin Evgeny Pavlovich,
Galova Maria Konstantinovna

APPLICATION OF THE HILBERT TRANSFORM FOR OPTIMIZING SIGNAL PROCESSING IN GNU RADIO

In the course of the study, an analysis of the Hilbert transform was conducted. This operation facilitated an important stage in the processing of incoming signals within the GNU Radio software framework, which will be necessary for the implementation of radio direction-finding systems for accurate location determination and tracking of moving objects transmitting signals in future projects. The results obtained contribute to the formation of a theoretical and practical foundation for the creation of high-precision radio systems.

Keywords: Hilbert transform, GNU Radio, signal processing, radio system

Введение

В условиях стремительного развития технологий и нарастающих потребностей в точной навигации и мониторинге возникает необходимость в оптимизированной обработке сигналов для реализации радиосистем с расширенными функциональными возможностями [1,2]. Радиопеленгационные системы представляют собой наиболее актуальный вариант для распознавания координат передающих сигналов, поскольку такие технологии находят применение в различных сферах, включая безопасность, транспорт и связь. В связи с этим особую важность приобретает обработка сигналов, которая является основой для полноценной работы таких систем[2-4].

В рамках данного исследования был проведен анализ теоретических основ и математических свойств преобразования Гильберта, применяемого для обработки сигналов. Исследование осуществлялось в графической среде

программирования GNU Radio [5], где с помощью создания блок-схем и использования открытого исходного кода возможно реализовать множество инструментов для виртуального моделирования обработки, передачи и приема сигналов. В частности, для упрощения громоздких вычислений, необходимых для определения задержки между поступающими сигналами, был разработан собственный блок в GNU Radio. Этот блок включает в себя необходимые функции для выполнения вычислений в одно действие, что значительно упростит дальнейшие исследования [6-8].

Полученные результаты могут значительно повысить эффективность процессов в работе с сигналами, открывая перспективы для создания высокоточных радиосистем.

Сущность преобразования Гильберта

Преобразование Гильберта является важным инструментом в обработке сигналов, позволяющим получить аналитический сигнал из вещественного. Данная операция математически определяется следующим образом (выражение 1):

$$H[f(t)] = f(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\tau)}{t-\tau} d\tau, \quad (1)$$

где $f(t)$ – исходный сигнал, τ – переменная интегрирования для оценивания каждого значения сигнала.

Знаменатель указывает на разницу между текущим моментом времени и переменной интегрирования. Это имеет важное значение, поскольку сам процесс преобразования зависит от того, как сигнал в одной точке времени влияет на другие. Когда переменная близка к текущему моменту времени, разница становится очень малой, что приводит к возникновению сингулярности [9].

Свертка исходного сигнала имеет сингулярность в нулевой точке, что делает интеграл неправильным и требует особого подхода к его вычислению. В результате получается аналитический сигнал, который представляет собой комплексную составляющую, где одна часть соответствует исходному сигналу, а другая часть — сигналу с использованием преобразования Гильберта. Это преобразование изменяет фазу исходного сигнала, но не затрагивает его амплитуду [9,10]. Результирующий аналитический сигнал можно записать следующим образом (выражение 2):

$$\tilde{f}(t) = f(t) + iH|f(t)|, \quad (2)$$

где $f(t)$ – исходный сигнал, $H|f(t)|$ - преобразование Гильберта.

Исходный сигнал $f(t)$ представлен на графике (Рис. 1), созданном в GNU Radio. Это обычная гармоническая функция, воссозданная с помощью блока генерации косинусоидального сигнала. Важным аспектом является то, что тип данных блока был специально выбран вещественным для дальнейших преобразований.

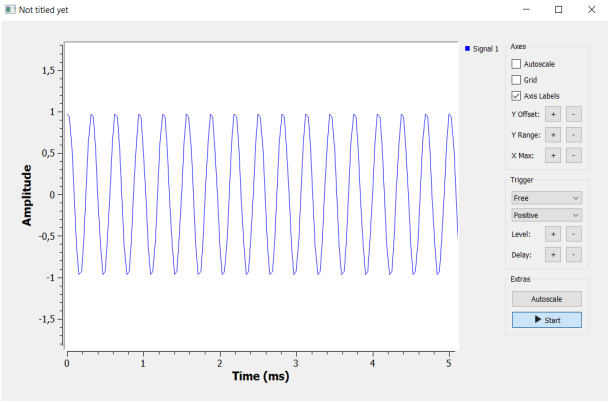


Рис. 1 Исходный вещественный сигнал $f(t)$

Сущность преобразования Гильберта иллюстрируется на соответствующем графике (Рис. 2), где исходный сигнал подвергается математическим преобразованиям и формируется аналитический сигнал. Это обеспечивает более полное представление для анализа и обработки, поскольку любой физический сигнал может быть представлен в виде системы, состоящей из действительной и мнимой частей. Такое комплексное представление широко используется в программных средах для генерации реалистичных сигналов, что позволяет проводить моделирование и тестирование блок-схем без необходимости привлечения физических приемных устройств.

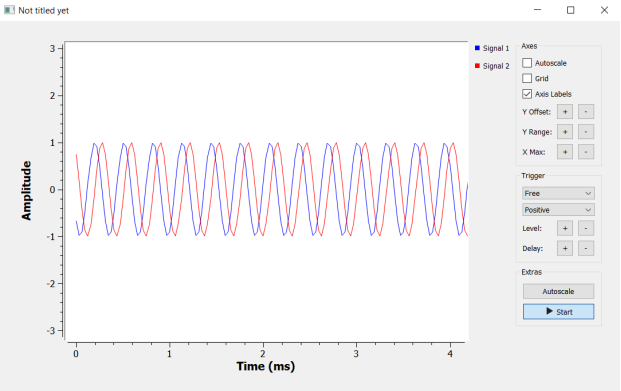


Рис. 2 Аналитический комплексный сигнал $\tilde{f}(t)$*. Синий – оставшийся исходный (действительная часть), красный – дополнительный со сдвигом фазы на 90° (мнимая часть)*

Составление блок-схемы с преобразованием Гильберта

На основе полученных данных была разработана блок-схема (Рис. 3), в которой преобразование Гильберта играет ключевую роль на начальном этапе обработки сигналов. В данной схеме рассматривается сигнал, поступающий на две приемные антенны, расположенные на различных расстояниях друг от друга. На моменте создания сигналов в один из блоков был добавлен параметр сдвига фаз значением 3,14 радиан. Основной задачей является определение координат маячка, который передает этот сигнал. Поскольку сигналы идеализированные, а самого маячка физически не существует, то на раннем этапе будет достаточно получить сравнение задержек по характеристикам поступивших сигналов.

В целях упрощения процесса был создан специализированный блок «Shift Phase», предназначенный для мгновенного вычисления сдвига фаз в одно действие для упрощения и оптимизации схемы. Это позволяет эффективно определять задержку сигнала, что, в свою очередь, поспособствует точному вычислению координат маячка.

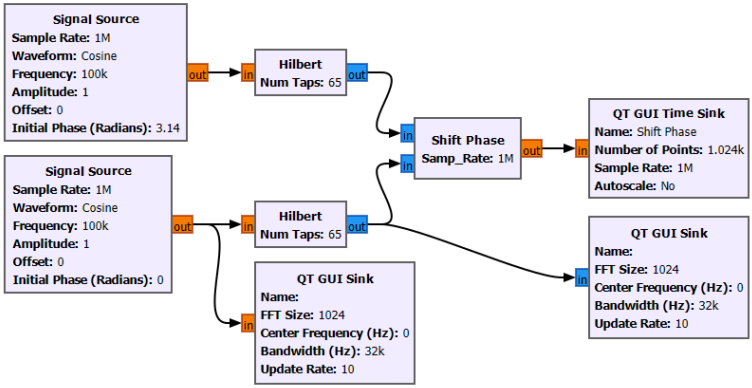


Рис. 3 Блок-схема для обработки сигналов и вычисления мгновенного сдвига фаз между ними

Результатом разработки данной блок-схемы стало преобразование сигналов в аналитическую форму, что позволило осуществить вывод сдвига фаз на спектрограмму (Рис. 4). Эта спектрограмма визуализирует мгновенные вычисления, в данном эксперименте, как и было задумано реализовался вывод постоянного сдвига фаз 3,14 радиан, демонстрируя изменения сдвига фаз в зависимости от времени, в течение которого проходят эти сигналы.

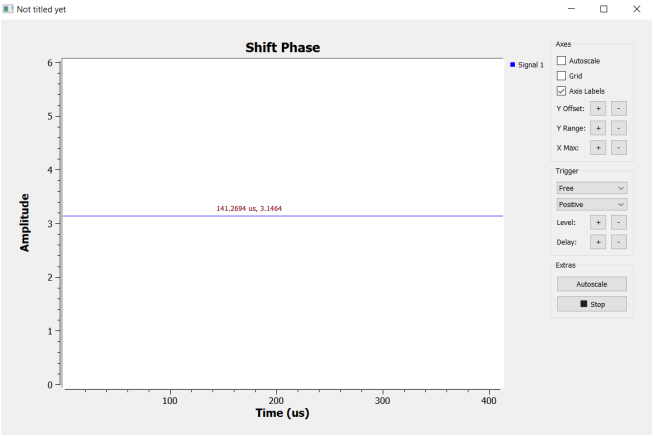


Рис. 4 Полученная спектрограмма вывода сдвига фаз

Полученные результаты подчеркивают эффективность предложенного подхода и его способность к детальному анализу временных изменений. Такой подход обеспечивает наглядное представление динамики сигналов и позволяет исследовать их характеристики в реальном времени.

Выводы

В ходе проведенного исследования была рассмотрена актуальная задача оптимизации обработки сигналов с помощью преобразования Гильберта, необходимая для развития современных радиопеленгационных систем. Использование данной математической операции в среде GNU Radio позволило облегчить моделирование и анализ сигналов, а специализированный блок значительно упростил выполнение ключевых расчетов, что может поспособствовать расширению возможностей последующих научных и практических исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попков, О. А. Миниатюрные радиоконтактные устройства / О. А. Попков. – Москва: Импульс, 2006. – 62 с.

2. Гоноровский И. С. Основы радиотехники / И. С. Гоноровский – М.: Связьиздат. – 1957. – 727 с.

3. Scott, J., Hoy, M. Group–Delay Measurement of Frequency–Converting Devices using a Comb Generator / Jonathan Scott, Michael Hoy // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2010. –Vol. 59. – Iss. 11. – pp: 3012—3017.

4. Павлов, Л. А. Структуры и алгоритмы обработки данных: учебник / Л. А. Павлов, Н. В. Первова. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 256 с.

5. Костин М.С, Ярлыков А.Д. Архитектурно-конфигурируемые SDR-технологии радиомониторинга и телеметрии / М.С. Костин, А.Д. Ярлыков - Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 148 с.

6. Голиков, А. М. Модуляция, кодирование и моделирование в телекоммуникационных системах. Теория и практика / А. М. Голиков. – Санкт-Петербург: Лань, 2018. – 419 с.

7. “What is I/Q Data?,” National Instruments, 16 10 2019. [Online]. Available: http://www.ni.com/tutorial/4805/en/. [Accessed 28 04 2020].

8. Баженов, В.Г. Цифровая система измерения фазовых сдвигов радиоимпульсных сигналов / В. Г. Баженов, Г. А. Богдан, М. В. Кравченко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 4. – С. 36– 38.

9. S. L. Hahn, “Hilbert transforms,” in The Transforms and Applications Handbook (A. Poularakis, Ed.), Boca Raton FL: CRC Press, 1996, ch. 7.

10. Брычков, Ю.Ф. Интегральные преобразования обобщенных функций / Ю.А. Брычков, А.П. Прудников – Москва: Наука, 1977. – 287 с.

Автор: Калюжная Софья Евгеньевна, студент кафедры радиофизики и нанотехнологий физико-технического факультета Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040, телефон: +7 (9676) 74-75-15, e-mail: kaliuzhnaya.sophia.evgenevna@gmail.com

Author: Kaliuzhnaya Sophia Evgenevna, student of the Department of Radiophysics and Nanotechnology of the Physics and Technology Faculty of the Kuban State University, Russia, Krasnodar, 149 Stavropolskaya street, 350040, phone: +7 (9676) 74-75-15, email: kaliuzhnaya.sophia.evgenevna@gmail.com

Автор: Никитин Евгений Павлович, студент кафедры радиофизики и нанотехнологий физико-технического факультета Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040, телефон: +7 (9649) 44-56-61, e-mail: mr.keep09@yandex.ru

Author: Nikitin Evgeny Pavlovich, student of the Department of Radiophysics and Nanotechnology of the Physics and Technology Faculty of the Kuban State University, Russia, Krasnodar, 149 Stavropolskaya street, 350040, phone: +7 (9649) 44-56-61, email: mr.keep09@yandex.ru

Автор: Галова Мария Константиновна, студент кафедры радиофизики и нанотехнологий физико-технического факультета Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040, телефон: +7 (9883) 17-76-31, e-mail: galovamaria0410@gmail.com

Author: Galova Maria Konstantinovna, student of the Department of Radiophysics and Nanotechnology of the Physics and Technology Faculty of the Kuban State University, Russia, Krasnodar, 149 Stavropolskaya street, 350040, phone: +7 (9883) 17-76-31, email: galovamaria0410@gmail.com

УДК 534.6

Кокунин Петр Анатольевич
Егоров Дмитрий Владимирович

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ И АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО СТАНДАРТУ ANSI/CTA-2034A

В настоящей работе представлена автоматизированная система измерения и анализа характеристик акустических систем по методикам, представленным в международном стандарте ANSI/CTA-2034A. В рамках работы был разработан и изготовлен измерительный стенд и проведены исследования трех акустических систем, одна собственного изготовления, две от домашних аудио систем, приведен анализ характеристика, показано, что разработанная система может быть использована как для исследования характеристик существующих систем, так и в процессе разработки новых систем.

Ключевые слова: акустическая система, амплитудно-частотная характеристика, диаграмма направленности, окно прослушки, индекс направленности силы звука

Kokunin Petr Anatolevicn
Egorov Dmitry Vladimirovich

MEASUREMENT AND ANALYSIS PARAMETERS SYSTEM FOR ACOUSTICS SYSTEMS ACCORDING TO ANSI/TIA-2034A STANDARD

This paper presents an automated system for measuring and analyzing the characteristics of acoustic systems according to the methods presented in the international standard ANSI/CTA-2034A. As part of the work, a measuring stand was developed and manufactured and three acoustic systems were studied, one of their own manufacture, two from home audio systems, an analysis of the characteristics was given, it was shown that the developed system can be used both to study the characteristics of existing systems and in the process of developing new systems.

Keywords: acoustic system, amplitude-frequency response, directional pattern, eavesdropping window, sound intensity directional index

Введение

Акустические системы являются неотъемлемой частью восприятия аудио и видео контента в современном обществе. Большое разнообразие на рынке аудиосистем как профессиональных, систем для аудиофилов, так и для домашнего использования делает задачу выбора по соотношению цена/качество достаточно сложной.

Не всегда дороговизна системы гарантирует лучшее качество, как и наоборот, можно подобрать относительно недорогие системы, которые позволяют решать поставленные задачи, примером могут быть результаты теста представленные в [1].

Другой важной задачей является построение измерительной системы, обеспечивающей возможность изучения характеристик вновь создаваемых акустических систем, при этом должна обеспечиваться как повторяемость проводимых экспериментов, так и их достоверность.

В настоящей работе представлена такая система и результаты исследования трех акустических систем, одной собственного изготовления и двух от домашних аудиосистем SONY SS-SBT100 и AIWA NSX-R82.

Основная часть

В соответствии с рекомендациями стандарта ANSI/CTA-2034A была разработана и изготовлена система исследования характеристик акустических систем, структурная схема которой представлена на рисунке 1.

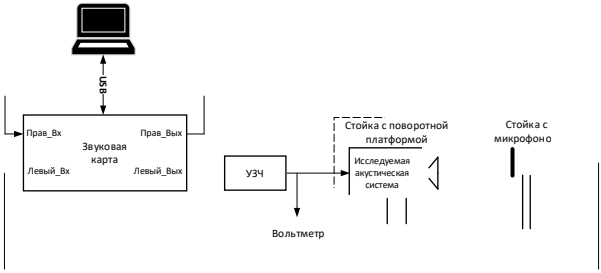


Рис. 1 Структурная измерительного стенда

Основные аппаратные компоненты измерительного стенда: ноутбук Asus Vivobook Go 15, звуковая карта Universal Audio Volt 2, усилитель мощности Topping PA3s, измерительный микрофон с калибровкой, мультиметр UNI-T UT890C. В стенде использовалось свободное программное обеспечение Room EQ Wizard, которое предназначено для измерения и визуализации характеристик акустических систем, VituixCAD2, которое предназначено для исследования амплитудно-частотных характеристик акустических систем.

В рамка данной работы были проведены исследования характеристик трех акустических систем, результаты измерений представлены на рисунках 2 – 4.

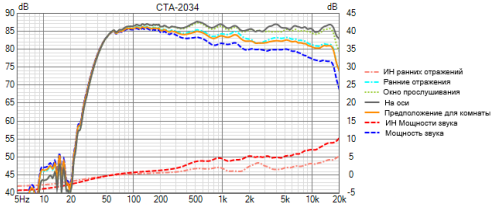


Рис. 2 АЧХ акустической системы собственного изготовления

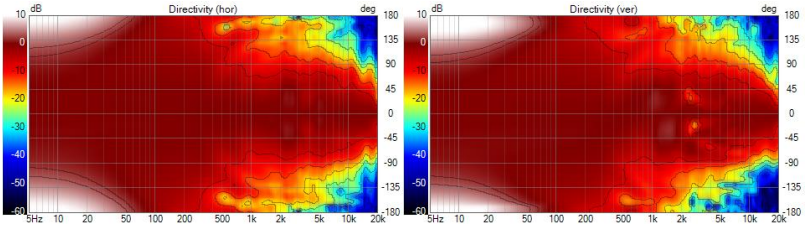


Рис. 3 Диаграммы направленности в горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) плоскостях акустической системы собственного изготовления

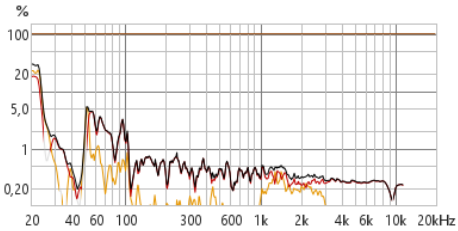


Рис. 4 Результаты измерения искажений акустической системы собственного изготовления

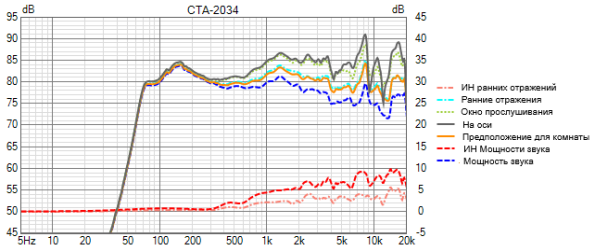


Рис. 5 АЧХ акустической системы SONY SS-SBT100

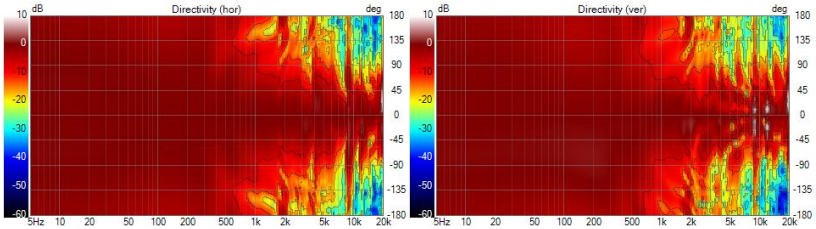


Рис. 6 Диаграммы направленности в горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) плоскостях акустической системы SONY SS-SBT100

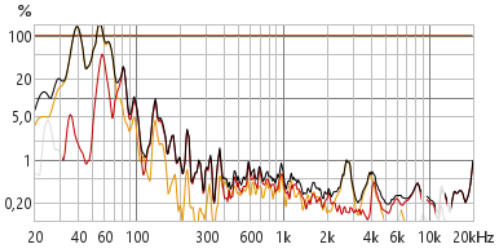


Рис. 7 Результаты измерения искажений акустической системы собственного изготовления SONY SS-SBT100

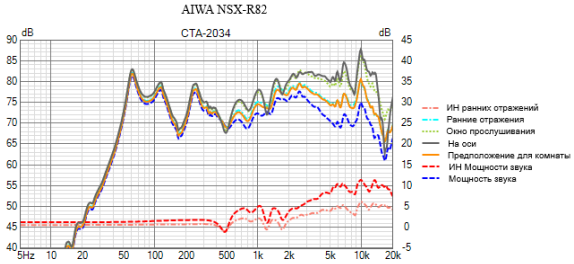


Рис. 8 АЧХ акустической системы AIWA NSX-R82

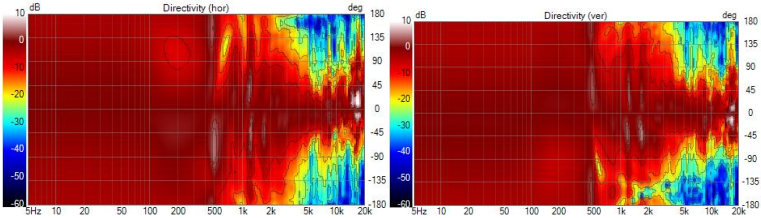


Рис. 9 Диаграммы направленности в горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) плоскостях акустической системы AIWA NSX-R82

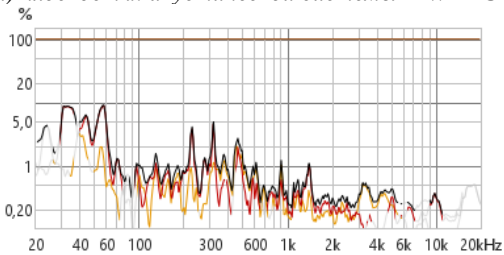


Рис. 10 Результаты измерения искажений акустической системы собственного изготовления AIWA NSX-R82

Таблица 1

Сравнение характеристик акустических систем

№	Характеристики	АС собственного изготовления	SONY SS-SBT100	AIWA NSX-R82
1	СТА-2034-А АЧХ на оси	Гладкий и ровный отклик Линейность +- 2,5 дБ	Пик 5 дБ на 150 Гц Подъем 5дБ после 700 Гц. Сильные неровности после 3 кГц. Линейность +- 13,3 дБ	Сильные неровности во всем диапазоне. Провал после 14 кГц Линейность +- 15,1 дБ
2	СТА-2034-А индекс направленности	Гладкий и ровный	Неровности после 2 кГц	Неровности на 475, 1250 и 1750 возможно возникли из-за недостаточного разрешения измерений. Хорошая направленность после 2 кГц.
3	Чувствительность в диапазоне 100 – 16000 Гц	86 дБ	85 дБ	82 дБ
4	Искажения (Повышение искажений до 200 Гц происходит из-за ошибки нормализации.)	На ур.зв. давления 86 дБ уровень искажений <1%.	На ур.зв. давления 85 дБ уровень искажений: до 200 Гц <10% от 200 Гц <1% Резонансы на 2,7 и 4 кГц.	На ур.зв. давления 82 дБ уровень искажений <1,5 %. Резонансы на 229, 319, 464, 911 и 1405 Гц.
5	Горизонтальная направленность	Гладкий и хорошо контролируемый луч. Направленность +- 70 °	Сильные неровности Направленность +- 60°	Сильные неровности. Несимметр. луч. Направленность + 10° - 40°
6	Вертикальная направленность	Гладкий и хорошо контролируемый луч. Направленность + 20° - 10 ° Провалы на 2,5 и 2,7 кГц.	Сильные неровности Направленность +- 5°	Сильные неровности. Направленность +- 30°

Выводы

Результаты тестирования разработанной системы показали ее работоспособность и удобство использования при исследовании характеристик акустических систем. Ниже представлен обобщенный анализ результатов измерения.

Акустическая система собственного изготовления имеет высокое качество звука. Звучание системы нейтральное, типичная чувствительность, широкая направленность и низкий уровень искажений.

SONY SS-SBT100 имеет более низкое качество звука, которое можно улучшить с помощью эквалайзер. Звучание системы существенно окрашено, чувствительность чуть ниже типичной, плохо контролируемая направленность. Высокий уровень искажений ниже 200 Гц.

AIWA NSX-R82 имеет низкое качество звука, которое невозможно исправить эквалайзером. Звучание системы существенно окрашено, низкая чувствительность, плохая направленность, искажения системы низкие, однако измерения проводились на громкости на 4 дБ ниже необходимого уровня звукового давления, заметные резонансы в нескольких метах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сравнительный тест 11 моделей полочных АС стоимостью 60 000 - 110 000 рублей // Hi-Fi.RU URL: https://www.hi-fi.ru/magazine/audio/sravnitelnyj-test-11-modelej-polochnyh-as-stoimostyu-60-000-110-000-rublej (дата обращения: 16.05.2025).

Автор: Кокунин Петр Анатольевич: кандидат технических наук, доцент кафедры физики перспективных технологий и материаловедения, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, город Казань, улица Салиха Сайдашева 12/3, 420101, телефон: +7 (917) 873-22-17, email: pkokunin@mail.ru

Егоров Дмитрий Владимирович, студент 4-го курса, группы 16-102 кафедры физики перспективных технологий и материаловедения, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, город Казань, улица Салиха Сайдашева 12/3, 420101, телефон: +7 (929) 720 5653, email: ieghorov.2003@gmail.com

Author: Kokunin Petr Anatolevich: Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor of Department of Advanced Technologies Physics and Materials Science, Institute of Artificial Intelligence, Robotics and System Engineering, Kazan (Volga Region) Federal University, 420101, Russia, Kazan, 12/3 Saylikha Saidasheva street, phone: +7 (917) 873-22-17, email: pkokunin@mail.ru

Egorov Dmitry Vladimirovich: 4th year student, group 16-102 of Department of Advanced Technologies Physics and Materials Science, Institute of Artificial Intelligence, Robotics and System Engineering, Kazan (Volga Region) Federal University, 420101, Russia, Kazan, 12/3 Saylikha Saidasheva street, phone: +7 (929) 720 5653, email: ieghorov.2003@gmail.com

УДК 621.396

Алябьев Сергей Игоревич, Кисель Наталья Николаевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ РЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК

Представлены результаты моделирования в среде Altair FEKO характеристик 3D-метаматриала на основе резистивных пленок. Проведена оценка коэффициента отражения нескольких модификаций материала в частотном диапазоне и угловом секторе.

Поглотитель, эффективная поверхность рассеяния, коэффициенты отражения.

Sergej Igorevich Alyab'ev, Natal'ya Nikolaevna Kisel'

DESIGN STUDY OF A BROADBAND ABSORBER BASED ON RESISTIVE FILMS

The results of the study in the Altair FEKO environment of the characteristics of 3D metamaterial based on resistive films are presented. The reflection coefficient of several modifications of the material in each frequency and angular direction is estimated.

Absorber, effective scattering surface, reflection coefficients.

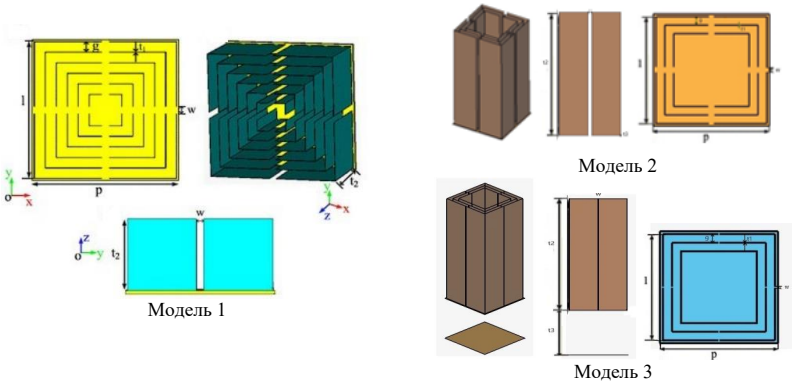
Введение

В последнее время активно исследуется возможность создания эффективных широкополосных поглощающих метаматериалов на основе резистивных пленок. Впервые данный тип поглощающих метаматериалов был предложен в [1]. Он состоял из трех слоев (металл-диэлектрик-металл) и обеспечивал хорошее поглощение в узкой полосе частот. В [2-12] приведены различные варианты поглощающих структур на основе резистивных плёнок, снижающие отражение от микроволнового до оптического диапазонов. 3D-поглощающий метаматериал на основе резистивных покрытий в микроволновом диапазоне был исследован в [13].

Основная часть

В данной работе исследован 3D-метаматериал на основе резистивных пленок, который обеспечивает поглощение не хуже -10 дБ в широкой полосе. Использование дополнительного резистивного слоя между экраном и 3D-метаматериалом аналогично эффекту поглотителя Солсбери и приводит к расширению диапазона частот поглощения в область нижних частот. На рис. 1 изображены модели метаматериалов: Модель 1 - имеет шесть резистивных пластин, размещённых на проводящем экране (рис.1,а), Модель 2 - тремя резистивными пластинами на проводящем экране (рис.1,б) и модель 3 - тремя

резистивными пластинами на резистивном основании, расположенный на некотором расстоянии от от проводящего экрана (рис. 1, б). Параметры резистивного основания выбираются с большей проводимостью, чем перпендикулярные резистивные пластины.



а) б)

Рис. 1 Ячейка трехмерного поглотителя с шестью, а) и тремя резистивными элементами б) на основе квадратных колец с зазорами

Геометрические размеры ячейки поглотителя составляет 2 мм на 1,95 мм, зазоры - 0,1 мм, а высота 1 мм (рис.1, а), расстояние между поглотителем и экраном принималось равным 2 мм (рис.2, б). Проводимость резистивного материала принималась равной $\sigma = 1000$ См/м, формирующего трехмерные ячейки, основание выполнялось из материала с проводимостью $\sigma = 1500$ См/м.

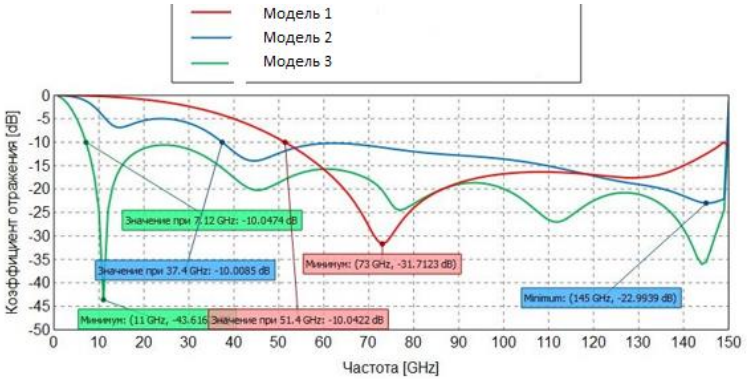


Рис. 2 Частотная характеристика коэффициента отражения для трёх моделей поглотителя на основе резистивных пленок

Из приведенных результатов видно, что использование воздушного зазора

между поглотителем и проводящим экраном (модель 3) позволяет расширить частотный диапазон, в котором реализован коэффициент отражения ниже -10 дБ.

На рис. 3 приведены угловые характеристики коэффициента отражения для модели 3 на фиксированных частотах: 20 ГГц, 40 ГГц, 60 ГГц, 80 ГГц.

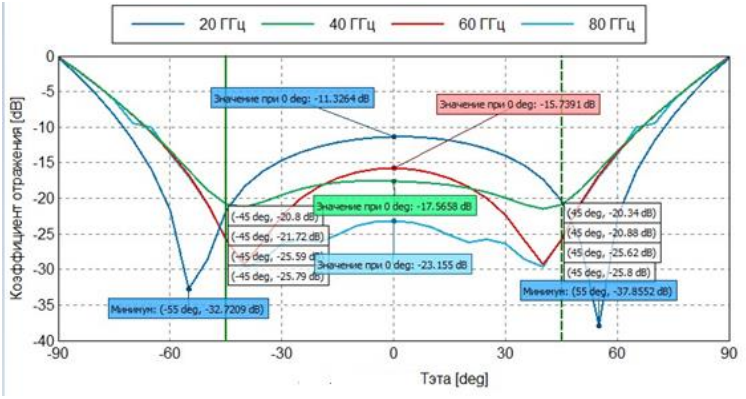


Рис. 3 Угловая характеристика коэффициента отражения для Модели 3

Как видно из результатов, коэффициент отражения ниже -10 дБ обеспечивается в угловом секторе $\pm 60^0$.

Выводы

Рассмотренный в работе 3D поглощающий метаматериал позволяет реализовать низкие уровни коэффициентов отражения в широком диапазоне частот и в угловом секторе $\pm 60^0$ при общей толщине поглотителя при с учётом воздушного зазора не более 4-7мм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mukherjee B, Simsek E. Utilization of monolayer MoS2 in Bragg stacks and metamaterial structures as broadband absorbers. Opt Commun. 2016;369:89–93.

2. Feng R, Ding W, Liu L, et al. Dual-band infrared perfect absorber based on asymmetric T-shaped plasmonic array. Opt Express. 2014;22:A335–A343.

3. Du Q, Zeng Z, Xiang D, et al. Stable high absorption metamaterial for wide-angle incidence of terahertz wave. J Mod Opt. 2014;61:621–625.

4. Luo H, Hu x, Qiu Y, et al. Design of a wide-band nearly perfect absorber based on multi-resonance with square patch. Opt Commun. 2014;188:5–11.

5. Yoo M, Kim HK, Lim S. Angular- and polarization-insensitive metamaterial absorber using subwavelength unit cell in multilayer technology. IEEE Antennas Wireless Propag Lett. 2016;15:414–417.

6. Lim J-H, Ryu Y-H, Kim S-S. Dual-band microwave absorption properties of metamaterial absorber composed of split ring resonator on carbonyl iron powder composites. Electron Mater Lett.2015;11:447–451.

7. Cao T, Wei C-W, Simpson RE, et al. Broadband polarization-independent perfect absorber using a phase-change metamaterial at visible frequencies. Sci Rep. 2014;4:3955.

8. Cheng Y, Nie Y, Gong R. A polarization-insensitive and omnidirectional broadband terahertz metamaterial absorber based on coplanar multi-squares films. Opt Laser Technol. 2013;14:415–421.

9. Fernández Álvarez H, de Cos Gómez ME, Las-Heras F. A six-fold symmetric metamaterial absorber. Materials. 2015;8:1590–1603

10. Bhattacharyya S, Ghosh S, Chaurasiya D, et al. Bandwidth-enhanced dual-band dual-layer polarization-independent ultra-thin metamaterial absorber. Appl Phys A. 2015;365:118:207–215.

11. Wu J. Broadband light absorption by tapered metal-dielectric multilayered grating structures. Opt Commun. 2016;365:93–98.

12. Wang BX, Wang LL, Wang GZ, et al. A simple design of a broadband polarization-insensitive and low-conductivity alloy metamaterial absorber. Appl Phys Express. 2014;7:082601.

13. Soheilifar MR, Sadeghzadeh RA. Design, fabrication and characterization of stacked layers planar broadband metamaterial absorber at microwave frequency. AEU – Int J Electron Commun. 2015;69:126–132.

Автор: Алябьев Сергей Игоревич, магистрант Института радиотехнических систем и управления, Россия, город Таганрог, улица Некрасовский 44, 347900, телефон: +7 (8634) 37-16-34, email: alyabev@sfedu.ru.

Кисель Наталья Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Некрасовский, 44, 347900, телефон: +7 (8634) 37-16-34, email: nnkisel@sfedu.ru.

Author: Sergey Igorevich Alyabiev, master of science Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, Russia, Taganrog, Nekrasovsky street, 44, 347900, phone: +7 (8634) 37-16-34, , email: alyabev@sfedu.ru.

Natalya Nikolaevna Kisel, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of the Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, Russia, Taganrog, Nekrasovsky street, 44, 347900, phone: +7 (8634) 37-16-34, email: nnkisel@sfedu.ru.

УДК 678.8

Белик Владимир Андреевич, Кисель Наталья Николаевна

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ПОГЛОТИТЕЛЬ ШАХТНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛА

Представлены результаты моделирования в среде Altair FEKO характеристик 3D-метаматриала шахтного типа на основе метаматериала. Проведена оценка коэффициента отражения нескольких модификаций материала. Рассмотрена эффективность снижения ЭПР для различных конфигураций элементов в составе метаматериала.

Поглотитель, метаматериал, эффективная поверхность рассеяния.

Belik Vladimir Andreevich, Natal'ya Nikolaevna Kisel'

BROADBAND ABSORBER IN THE FORM OF HONEYCOMB BASED ON METAMATERIAL

The results of the study in the Altair FEKO environment of the characteristics of a 3D metamaterial of a mine type based on a metamaterial are presented. The reflection coefficient of several modifications of the material is estimated. The efficiency of reducing the RCS for various configurations of elements is considered.

Absorber, metamaterial, effective scattering surface

Введение

Разработка многофункциональных компактных поглотителей электромагнитных волн является важной задачей для многих практических применений, таких как защита персонала от вредных воздействий излучения, снижение радиолокационной заметности объектов. В последнее время активные разработки ведутся по созданию поглотителей на основе метаматериалов, позволяющие добиться высокой эффективности снижения отражения в достаточно широком диапазоне частот.

Основная часть

В литературе достаточно большое внимание уделено структурам в виде диэлектрического слоя, на который определенным образом наносят проводящие тонкие элементы разнообразной формы. Несомненно, такой материал имеет рядом преимуществ: толщина покрытия, легко можно нанести такой поглотитель на произвольную конформную поверхность. В работах [1-11] приводятся результаты снижения ЭПР для плоских метаповерхностей с различными формами элементов и способами их компоновки на поверхности.

В данной работе исследован широкополосный поглотитель шахтного типа на основе метаматериала. Такой поглотитель относится к 3D-метаповерхностям.

Пластины, формирующие шахтную структуру, выполнены из диэлектрических листов из материала Taconic TLY-5 толщиной h=0,508 мм с относительной диэлектрической проницаемостью 2.2 и тангенсом угла диэлектрических потерь 0.0009, общая высота шахтной структуры 8 мм. На поверхности диэлектрических листов нанесены проводящие элементы с обеих сторон в виде крестообразной, прямоугольной и гантелеобразной форм (рис.1). На основе таких элементов формируется поглотитель шахтного типа (рис. 2).

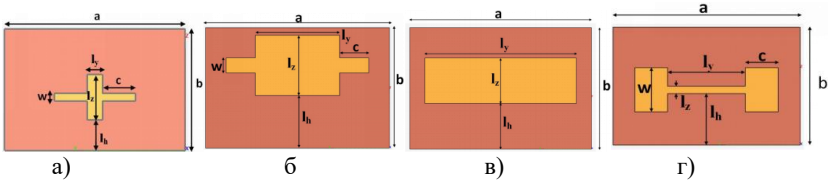


Рис. 1 Составляющие элементы шахтных поверхностей:
а) элемент А, б) - элемент В, в) элемент С, г) элемент D

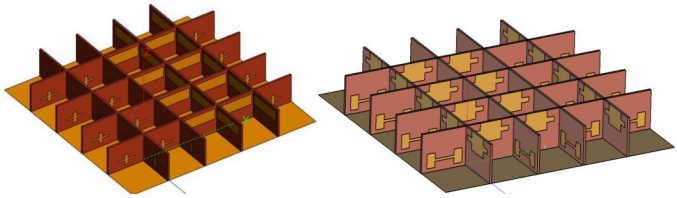


Рис. 2 Поглотитель шахтного типа размером 5a x 5a: а) - из элементов А и С (положение элемента по отношению к экрану: l_h=1 мм для А и l_h =4 мм для С); б) - из элементов В и D (l_h =4 мм для В и l_h =2 мм для D)

Выбор формы проводящих элементов, их положение на листах диэлектрика выбирается таким образом, чтобы сформировать дифференциальный фазовый сдвиг близкий 180 градусам. Для этого были исследованы частотные зависимости фазовых характеристик коэффициентов отражения бесконечных периодических структур, составленных из одинаковых элементов. На основании анализа этих характеристик были сформированы несколько моделей поглотителей (рис.2). Расчеты проводились с использованием Altair FEKO [12-14].

На рис.3 приведена частотные зависимости эффективности снижения ЭПР при использовании двух вариантов поглотителей на основе элементов A-C (рис.2, а) и B-D (рис.2, б). Исследования проводились в диапазоне 8-18 ГГц, рассматривался случай нормального падения волны к плоскости поглотителя.

Видно, что снижение ЭПР составляет не менее 10 дБ диапазоне 8,5-18 ГГц при использовании поглотителя на основе A-C и в диапазоне 9,7-15 ГГц для поглотителя с элементами B-D.

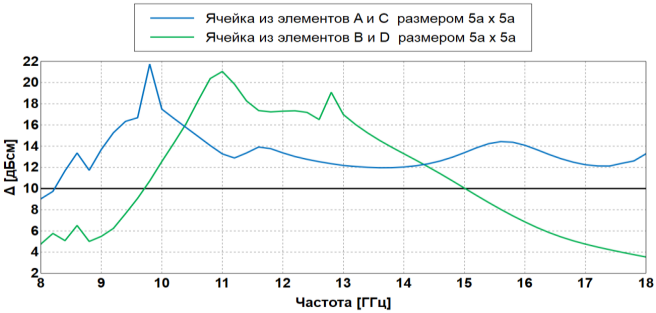


Рис. 3 Эффективность снижения ЭПР для различных конструкций размером 5*a* x 5*a*

Для наглядности на рис.4 приведены двухпозиционные диаграммы отражения от металлического экрана и экрана, укрытого поглотителями на основе элементов A-C и B-D соответственно на частотах 12 ГГц, 14 ГГц.

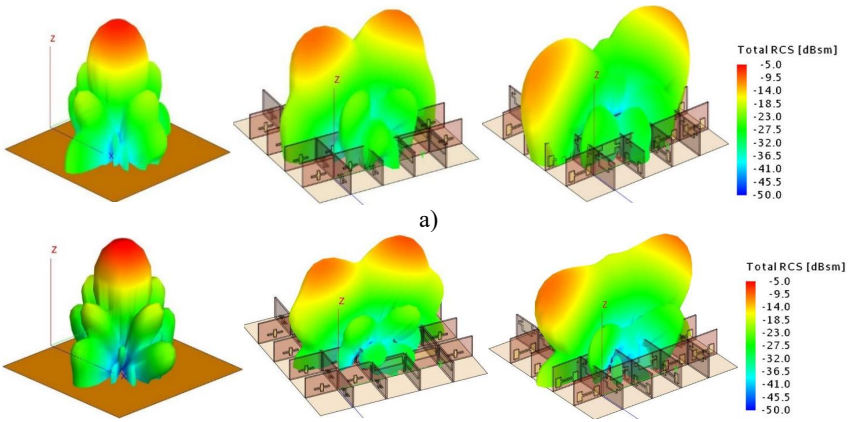


Рис. 4 Двухпозиционные диаграммы отражения для металлического экрана и двух поглотителей типа A-C и B-D на частотах а) 12 ГГц; б) 14 ГГц

Выводы

Таким образом показана возможность построения трехмерного поглотителя шахтного типа. В дальнейшем предполагается исследовать эффективность снижения ЭПР в угловом диапазоне, а также рассмотреть вопрос нанесения на диэлектрик пиксельных форм элементов метаматериала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вендик И. Б., Вендик О. Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (обзор) // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, № 1. – С. 3–29.

2. Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Бухарин М. М., Доброклонская М. С. Резонансное рассеяние плоских электромагнитных волн субволновой линейной структурой из двух диэлектрических колец // Прикладная физика. – 2023. – № 5. – С. 15–21.

3. Мироньчев А. С. Метаматериал из кольцевых проводников для радиодиапазона : дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. – Томск, 2017. – 151 с.

4. Chen W., Xiu X., Liu J., Xue Q., Che W. Two-Bit Ultra-Wideband Phase-Coded Metamaterials for Electromagnetic Scattering Manipulation // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2025. – Vol. 73, No. 2. – P. 714–725. – DOI: 10.1109/TMTT.2024.3425471

5. Al-Nuaimi M. K. T., Zhu S.-L., Huang G.-L., Ding W., Yang H. 1-Bit and 2-Bit Diffusive Metasurfaces for Scattering and RCS Reduction Using Cusp Phase Distribution // Proceedings of the 2024 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Beijing, China, 2024. – P. 1–3. – DOI: 10.1109/ICMMT61774.2024.10671990

6. Zhao C., Jiang W., Gong S. A Circularly Polarized Slot Array With Low RCS based on Ultra-wideband PCM // Proceedings of the 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Nanjing, China, 2021. – P. 1–3. – DOI: 10.1109/ICMMT52847.2021.9618591.

7. Fan G., Cheng Q. 1 Bit Electronically Reconfigurable Transmitarray Antenna with RCS Reduced Flexibly // Proceedings of the 2021 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM), Guangzhou, China, 2021. – P. 1–3. – DOI: 10.1109/iWEM53379.2021.9790422.

8. Li Z., Wen Z., Zhang Z., Luo J. An Ultra-broadband Metamaterial Absorber Based on the Square Split Ring // Proceedings of the 2021 22nd International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Rotterdam, Netherlands, 2021. – P. 1–2. – DOI: 10.1109/IVEC51707.2021.9722506

9. Yu K., Li Y., Wang Y. A dual-band metamaterial absorber with polarization insensitive and tunable characteristics // Proceedings of the 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - Italy (ACES), Firenze, Italy, 2017. – P. 1–2. – DOI: 10.23919/ROPACES.2017.7916054.

10. He Y., Jiang J. An ultra-wideband metamaterial absorber with active frequency selective surface // Proceedings of the 2015 9th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS), Oxford, UK, 2015. – P. 100–102. – DOI: 10.1109/MetaMaterials.2015.7342536

11. Sarin V. P., Vinesh P. V., Manoj M., Vasudevan K. A Miniaturized Electromagnetic Invisibility Cloaking Scheme // Proceedings of the 2020 International Symposium on Antennas & Propagation (APSYM), Cochin, India, 2020. – P. 67–70. – DOI: 10.1109/APSYM50265.2020.9350674.

12. Кисель Н.Н. Моделирование прикладных задач электродинамики и антенн на супервычислительной системе в пакете FEKO/ Таганрог: Изд-во ИТА ЮФУ, 2013.

13. Кисель Н. Н. Электродинамическое моделирование антенн и устройств СВЧ в пакете FEKO: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2010.

14. Кисель Н. Н. Основы компьютерного проектирования РЭС САПР СВЧ: учеб. пособие. – Таганрог: Изд-во ИТА ЮФУ, 2016.

Автор: Белик Владимир Андреевич – студент кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления ЮФУ, техник-проектировщик Передовой инженерной школы Адрес: Россия, Ростовская область, 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Телефон: +7 (8634) 37-16-32; email: vbeli@sfedu.ru.

Кисель Наталья Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры антенн и радиопередающих устройств Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Некрасовский, 44, 347900, телефон: +7 (8634) 37-16-34, email: nnkisel@sfedu.ru.

Author: Belik Vladimir Andreevich – student, Department of antennae and radio transmitting devices, development engineer of Leading engineer school, Southern Federal University, 347922, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovsky lane, phone: +7 (8634) 37-16-32, email: vbeli@sfedu.ru.

Kisel Natalya Nikolaevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Antennas and Radio Transmitting Devices of the Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, Russia, Taganrog, Nekrasovsky street, 44, 347900, phone: +7 (8634) 37-16-34, email: nnkisel@sfedu.ru.

УДК 621.382

Богатов Николай Маркович, Володин Владимир Сергеевич,
Григорьян Леонтий Рустемович, Коваленко Максим Сергеевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КРЕМНИЕВОЙ *N-I-P* НАНОСТРУКТУРЕ

Статья посвящена численному моделированию кремниевой наноразмерной n-i-p структуры с диффузионным профилем легирования и учетом поверхностных состояний. Показано, что напряженность электрического поля в высокоомной базе постоянна и возрастает с уменьшением плотности поверхностных состояний. Уменьшение плотности поверхностных состояний до 10^{12} см$^{-2}$ восстанавливает электрическое поле n-области, снижает эффективную скорость поверхностной рекомбинации.

Ключевые слова: n-p переход, потенциал электрического поля, уравнение Пуассона, поверхностные состояния, электроны, дырки, кремний.

Nikolay Markovich Bogatov, Vladimir Sergeevich Volodin,
Leontiy Rustemovich Grigoryan, Maxim Sergeevich Kovalenko

MODELING OF SURFACE ELECTRIC FIELD IN SILICON *N-I-P* NANOSTRUCTURE

The article is devoted to the numerical modeling of silicon nanoscale n-i-p structure with diffusion doping profile and taking into account surface states. It is shown that the electric field strength in the high-resistance base is constant and increases with decreasing density of surface states. Reducing the density of surface states to 10^{12} cm^{-2} restores the electric field of the n-region, reduces the effective rate of surface recombination.

Keywords: n-p junction, electric field potential, Poisson's equation, surface states, electrons, holes, silicon.

Введение

Наноразмерные *n-i-p* (*p-i-n*) структуры являются элементами современной электроники и оптоэлектроники. Эти структуры используются в следующих устройствах: энергонезависимая память, блоках защиты от статического напряжения, *p-i-n*-диоды с регулируемыми характеристиками, СВЧ диоды и др.

Уменьшение размеров *n-i-p* структур приводит к увеличению вклада свойств поверхности в характеристики приборов, играющих, как правило, отрицательную роль. Это обусловлено существованием плотности поверхностных состояний в запрещённой зоне, создающих поверхностный заряд, и рекомбинацией через эти состояния. Поверхностные энергетические уровни (таммовские состояния, уровни Шокли, уровни, созданные дефектами решетки, примесями и др.) имеют плотность $10^{11} \div 10^{15}$ см$^{-2}$. Современные

технологии обработки поверхности кремния позволяют снизить размер поверхностного слоя до 1 – 2 нм [1, 2].

Цель работы - моделирование внутреннего электрического поля в кремниевой *n-i-p* наноструктуре с учетом поверхностных состояний.

Основные уравнения

Условная схема моделируемой структуры показана на рис. 1. Область *n*-типа, созданная диффузией атомов фосфора в базу, расположена при $-w_n \le x < 0$. Высокоомная база расположена при $0 \le x < w_p$, она формируется осаждением на подложку *p*-типа толщиной $L >> w_{p2}$, из которой происходит диффузия бора в базу. Толщина диффузионного слоя акцепторов $\Delta w_p = w_{p2} - w_p$.

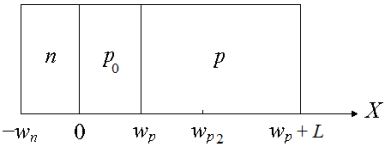


Рис. 1. Условная схема *n*-p_0-*p* структуры

Распределение примесей в *n*-слое определяется формулой

$$N(x) = N_P(x) - N_{B0} \text{ при } -w_n \le x \le w_p . \quad (1)$$

В формуле (1) N_P – концентрация фосфора, описываемая моделью диффузии из неограниченного источника

$$N_P(x) = N_{PP}\,\mathrm{erfc}\left(\frac{(x + w_n)}{x_{0P}}\right), \quad (2)$$

N_{PP} – концентрация фосфора на поверхности $x = -w_n$, $x_{0P} = 2\sqrt{D_P t_P}$, D_P – коэффициент диффузии фосфора, зависящий от температуры диффузии, t_P – время диффузии, $N_{B0} = const$ – концентрация бора в базе.

Распределение примесей в *p*-слое определяется формулой

$$N(x) = -(N_B(x) + N_{B0}) \text{ при } w_p \le x \le w_{p2} . \quad (3)$$

В формуле (3) N_B – концентрация бора, описываемая моделью диффузии из неограниченного источника

$$N_B(x) = (N_{BB} - N_{B0})\,\mathrm{erfc}\left(\frac{(w_{p2} - x)}{x_{0B}}\right), \quad (4)$$

N_{BB} – концентрация бора на поверхности $x = w_{p2}$, $x_{0B} = 2\sqrt{D_B t_B}$, D_B – коэффициент диффузии бора, зависящий от температуры диффузии, t_B – время диффузии бора в базу.

В подложке $N(x) = -N_{BB}$ при $w_{p2} < x \le w_p + L$.

Концентрация ионизованных доноров и акцепторов определяется формулами

$$N_P^{ion}(x) = \frac{N_P(x)}{1 + g_P e^{\frac{F + q\varphi(x) - E_g + E_P}{kT}}}, \quad N_B^{ion}(x) = \frac{N_B}{1 + g_B e^{\frac{E_B - F - q\varphi(x)}{kT}}}, \quad (5)$$

где F – электрохимический потенциал (уровень Ферми), k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, E_P – энергетический уровень примесного атома фосфора в запрещенной зоне, g_P – фактор вырождения этого уровня, E_B – энергетический уровень примесного атома бора в запрещенной зоне, g_B – фактор вырождения этого уровня, E_g – ширина запрещенной зоны, q – элементарный заряд, $\varphi(x)$ – потенциал внутреннего электрического поля. Металлургическая граница n-p перехода расположена при $x = 0$, где выполняется условие $N^{ion}(0) = 0$.

Плотность заряженных состояний в поверхностной области размером w_s определяется функцией [3]

$$N_s(x) = \begin{cases} \dfrac{N_{ss}kT}{E_g} \ln \dfrac{\left(1 + e^{\frac{F + q\varphi(x) - \frac{E_g}{2}}{kT}}\right)\left(1 + e^{\frac{E_g - F - q\varphi(x)}{kT}}\right)}{\left(1 + e^{\frac{F + q\varphi(x)}{kT}}\right)\left(1 + e^{\frac{\frac{E_g}{2} - F - q\varphi(x)}{kT}}\right)}, \text{при } -w_n \le x < (w_s - w_n), \\ 0, \text{при } (w_s - w_n) \le x \le w_p + L \end{cases} \quad (6)$$

где N_{ss} – плотность поверхностных состояний в запрещённой зоне.

Концентрации электронов $n(x)$, дырок $p(x)$ рассчитываются по формулам

$$n(x) = N_c e^{\frac{F - E_g + q\varphi(x)}{kT}}, \quad p(x) = N_v e^{\frac{-F - q\varphi(x)}{kT}}, \quad (7)$$

где N_c – эффективная плотность электронных состояний в окрестности дна зоны проводимости, N_v – эффективная плотность электронных состояний в окрестности вершины валентной зоны, E_g – ширина запрещенной зоны, уровень Ферми F отсчитывается от вершины валентной зоны в точке $x = w_p + L$.

Потенциал внутреннего электрического поля является решением уравнения Пуассона:

$$\frac{d^2}{dx^2}\varphi(x) = -\frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}\left(p(x) - n(x) + N^{ion}(x) + N_s(x)\right), \quad (8)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость вещества, ε_0 – диэлектрическая постоянная, $N^{ion}(x)$ – концентрация ионизованных доноров и акцепторов.

Дополнительным условием для уравнения (8) является условие общей электронейтральности:

$$\int_{-w_n}^{w_p + L} \left(p(x) - n(x) + N^{ion}(x) + N_s(x)\right) dx = 0. \quad (9)$$

Из условия (9) следует, что

$$\left.\frac{d}{dx}\varphi(x)\right|_{x=-w_n} = \left.\frac{d}{dx}\varphi(x)\right|_{x=w_p+L}. \qquad (10)$$

Вне рассматриваемой структуры в равновесных условиях напряженность электрического поля $E(x) = -\frac{d}{dx}\varphi(x)$ равна нулю, тогда условие (10) принимает вид

$$\left.\frac{d}{dx}\varphi(x)\right|_{x\le -w_n} = 0, \qquad (11)$$

Выбор начала отсчета потенциала произволен, поэтому считаем, что

$$\varphi(w_p + L) = 0. \qquad (12)$$

Используя условие локальной нейтральности подложки, найдем равновесное значение F.

Из (11) следует, что $\varphi(x) = \varphi_0$ при $x \le -w_n$. Константа φ_0 явно не задается, а определяется в итерационном процессе.

Уравнение (8) в разностной форме с дополнительными условиями (9, 12) решалось численно методом, изложенным в работах [3, 4].

Результаты моделирования

Рассмотрим результаты моделирования кремниевой структуры с наноразмерными слоями n-p_0-p при температуре 300 К. Концентрация фосфора на поверхности $N_{PP} = 10^{20}$ см$^{-3}$, бора в базе $N_{B0} = 10^{11}$ см$^{-3}$, бора в подложке $N_{BB} = 10^{20}$ см$^{-3}$, геометрические размеры: $w_n = w_p = \Delta w_p = 20$ нм.

На рис. 2 показано изменение потенциала электрического поля $\varphi(x)$. На рис. 3, рис. 4 показано изменение напряженности электрического поля $E(x)$ в различных масштабах. Существование максимума потенциала $\varphi(x)$ в поверхностном слое n-области обусловлено отрицательно заряженными поверхностными состояниями. При $N_s \ge 10^{13}$ см$^{-2}$ область пространственного заряда (ОПЗ) n-p_0-перехода сливается с ОПЗ поверхности, при $N_s \le 10^{12}$ см$^{-2}$ поверхностные состояния не влияют на электрическое поле n-области.

Поверхностная область создает потенциальный барьер треугольной формы для транспорта носителей заряда с основанием $a \approx 6$ нм, максимальная высота этого барьера $h \approx E_g/2$ при $N_{ss} = 10^{15}$ см$^{-2}$. Высота поверхностного барьера убывает с уменьшением N_{ss}.

Вектор напряженности электрического поля в поверхностной области противоположен вектору напряженности в базе, максимальное значение модуля напряженности превышает $2{\cdot}10^8$ В/м при $N_{ss} = 10^{15}$ см$^{-2}$, что увеличивает эффективную скорость поверхностной рекомбинации [4]. При уменьшении плотности поверхностных состояний менее 10^{12} см$^{-2}$ этот эффект исчезает.

Напряженность электрического поля в высокоомной базе (рис. 4) практически постоянна, возрастает с уменьшением плотности поверхностных состояний N_{ss} и достигает значения $E_{max} > 2.1{\cdot}10^7$ В/м при $N_{ss} < 10^{13}$ см$^{-2}$. В таком электрическом поле происходит разогрев неравновесных носителей заряда, наблюдается нелинейная зависимость их дрейфовой скорости от

напряженности электрического поля, пролетный режим транспорта, ударная ионизация и другие нелинейные эффекты.

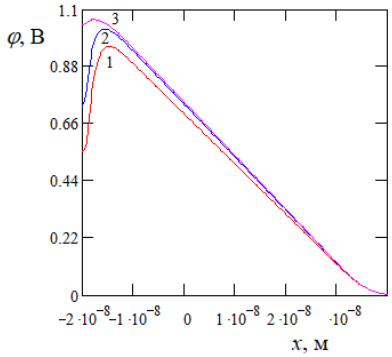


Рис. 2. Распределение электрического потенциала $\varphi(x)$ для различных значений плотности поверхностных состояний N_{ss}:
1 – $N_{ss} = 10^{15}$ см$^{-2}$, 2 – $N_{ss} = 10^{14}$ см$^{-2}$, 3 – $N_{ss} = 10^{13}$ см$^{-2}$

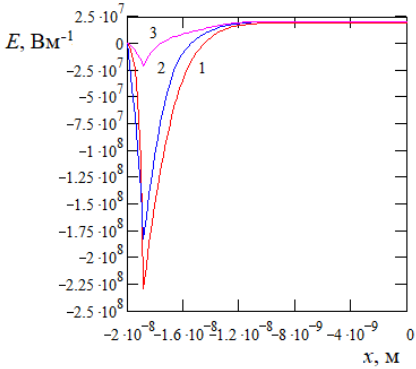


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля $E(x)$ в n-слое для различных значений плотности поверхностных состояний N_{ss}:
1 – $N_{ss} = 10^{15}$ см$^{-2}$, 2 – $N_{ss} = 10^{14}$ см$^{-2}$, 3 – $N_{ss} = 10^{13}$ см$^{-2}$

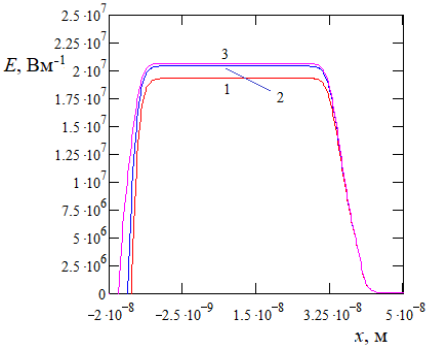


Рис. 4. Распределение положительных значений напряженности электрического поля $E(x)$ для различных значений плотности поверхностных состояний N_{ss}:
1 – $N_{ss} = 10^{15}$ см$^{-2}$, 2 – $N_{ss} = 10^{14}$ см$^{-2}$, 3 – $N_{ss} = 10^{13}$ см$^{-2}$

Выводы

Выполнено численное моделирование кремниевой наноразмерной n-i-p структуры с диффузионным профилем легирования и учетом поверхностных состояний. Показано, что напряженность электрического поля в высокоомной базе постоянна и возрастает с уменьшением плотности поверхностных состояний. Пассивация поверхности пленкой диэлектрика позволяет уменьшить плотность поверхностных состояний до 10^{12} см$^{-2}$ так, что они не влияют на электрическое поле n-области, исчезает поверхностный потенциальный барьер, снижается эффективная скорость поверхностной рекомбинации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИИ СПИСОК

1. Волковский Ю.А., Серегин А.Ю., Фоломешкин М.С. и др. Исследование состояния приповерхностного слоя полированных кремниевых подложек методом рентгеновской рефлектометрии в зависимости от методов их очистки // Поверхность, 2021, № 9, С. 40–48.

2. Юров В.М., Жанабергенов Т., Гученко С.А. Толщина поверхностного слоя типичных полупроводников // The scientific heritage, 2020, № 43, С. 20–23.

3. Богатов Н.М. Численное решение уравнения Пуассона в *n-p* переходе с учетом поверхностных состояний // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2024, Т. 21, № 3, С. 61 – 69.

4. Богатов Н.М., Володин В.С., Григорьян Л.Р., Коваленко М.С. Влияние поверхностных состояний на электрическое поле *n-p* перехода // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 3. С. 266 – 275.

Автор: Николай Маркович Богатов, д.ф.-м.н., профессор, ФГБОУ ВО «КубГУ», Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская 149, 350040, тел.: +7(903) 451-31-06, email: bogatov@phys.kubsu.ru.

Автор: Владимир Сергеевич Володин, аспирант, ФГБОУ ВО «КубГУ», Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская 149, 350040, тел.: +7(989) 820-36-72, email: volodinvs1995@mail.ru.

Автор: Леонтий Рустемович Григорьян, к.ф.-м.н., доцент, ФГБОУ ВО «КубГУ», Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская 149, 350040, тел.: +7(918) 168-17-19, email: leonmezon@mail.ru.

Автор: Максим Сергеевич Коваленко, к.ф.-м.н., доцент, ФГБОУ ВО «КубГУ», Россия, г. Краснодар, ул. Ставропольская 149, 350040, тел.: +7(918) 469-49-54, email: m.s.kovalenko@ya.ru.

Author: Nikolay Markovich Bogatov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Kuban State University, 350040, Russia, Krasnodar, 149, Stavropolskaya street, phone: +7(903) 451-31-06, email: bogatov@phys.kubsu.ru.

Author: Vladimir Sergeevich Volodin, Graduate Student, Kuban State University, 350040, Russia, Krasnodar, 149, Stavropolskaya street, phone: +7(989) 820-36-72, email: volodinvs1995@mail.ru.

Author: Leontiy Rustemovich Grigoryan, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor, Kuban State University, 350040, Russia, Krasnodar, 149, Stavropolskaya street, phone: +7(918) 168-17-19, email: leonmezon@mail.ru.

Author: Maxim Sergeevich Kovalenko, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor, Kuban State University, 350040, Russia, Krasnodar, 149, Stavropolskaya street, phone: +7(918) 469-49-54, email: m.s.kovalenko@ya.ru.

УДК 621.396

Ваганова Анастасия Алексеевна, Кисель Наталья Николаевна,
Панычев Андрей Иванович

РЕКОНФИГУРИРУЕМАЯ МИКРОПОЛОСКОВАЯ АНТЕННА ДЛЯ УСТРОЙСТВ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

Использование реконфигурируемых антенн позволяет повысить эффективность приема сигнала в условиях множественных переотражений, поскольку обеспечивает возможность выбора оптимальных для конкретной ситуации частотных и поляризационных свойств антенны. Ранее авторами была предложена конструкция антенны для устройств беспроводной связи, работающей в диапазоне 2 — 7 ГГц, имеющей малые габариты и способной перестраиваться по частоте и поляризации. Целью данной работы является экспериментальная проверка характеристик предложенной антенны для подтверждения ее работоспособности.

Реконфигурируемая антенна, микрополосковая антенна, S11-параметр, коэффициент стоячей волны, САПР FEKO.

Vaganova Anastasia Alekseevna, Kisel Natalia Nikolaevna,
Panychev Andrey Ivanovich

RECONFIGURABLE MICROSTRIP ANTENNA FOR WIRELESS COMMUNICATION DEVICES

The use of reconfigurable antennas allows to increase the efficiency of signal reception in conditions of multiple reflections, since it provides the possibility to choose the optimal frequency and polarization properties of the antenna in a specific situation. Previously, the authors proposed an antenna design for wireless communication devices. Proposed antenna operates in 2 - 7 GHz range, has small size and is capable of retuning its frequency and polarization. The purpose of this work is the experimental verification of the proposed antenna characteristics to confirm its operability.

Reconfigurable antenna, microstrip antenna, S11-parameter, standing wave ratio, CAD FEKO.

Введение

Одним из перспективных вариантов повышения качества связи в условиях многолучевого распространения является использование реконфигурируемых антенн. В соответствии с требованиями, предъявляемыми конкретной ситуацией, могут изменяться такие параметры как диапазон частот с наилучшим согласованием [1 – 4], диаграмма направленности, поляризация [5 – 8], либо сразу несколько параметров. В [9 – 11] предложена конструкция реконфигурируемой микрополосковой антенны, переключаемой по частоте и поляризации, и приведены результаты моделирования ее характеристик в

САПР FEKO [12]. Целью данной работы является экспериментальная проверка характеристик предложенной антенны для подтверждения ее работоспособности.

Основная часть

На рис. 1 показана конструкция антенны, предложенной в [9 – 11]. Излучающая часть антенны (рис. 1, а) имеет вид ромба, к которому с двух сторон может поступать сигнал из общего порта. В ветви для передачи сигнала встроены pin-диоды D1 и D2, в зависимости от режима работы которых симметрия конструкции может быть нарушена, за счет чего может изменяться поляризация. Конструкция заземляющей плоскости (рис. 1, б) изменяется переключением pin-диодов D3, D4 и D5, скачкообразно меняя резонансную частоту антенны в диапазоне 2 – 7 ГГц. Далее открытые pin-диоды обозначаются как «1», а закрытые – «0».

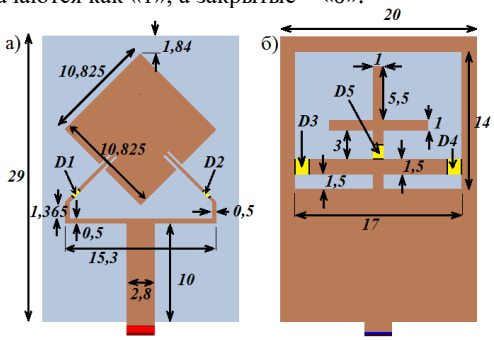


Рис. 1 Конструкция антенны

Моделирование характеристик антенны в программе FEKO [12], результаты которого приведены в [9 – 11], показало, что в зависимости от включения либо выключения различных диодов антенна способна работать в нескольких частотных диапазонах, лежащих в пределах 2 – 7 ГГц, изменяя при этом поляризацию с правой на левую на одной частоте для каждой пары режимов, отличающихся только состоянием D1 и D2 (то есть, компоненты поля правого вращения в режиме 01110 равны компонентам поля левого вращения в режиме 10110 и наоборот).

Для проверки работоспособности антенны изготовлен макет, показанный на рис. 2. Макет антенны изготовлен из материала FR4 с диэлектрической проницаемостью ε = 3,7 и тангенсом угла потерь tgδ = 0,018. Вместо pin-диодов используются плоские металлические перемычки. Экспериментальная проверка выполнена для двух случаев – открыты диоды D1, D3 и D4 (10110) и открыты диоды D1, D2, D3 и D4 (11110). Измерения выполнены с помощью анализатора цепей Agilent E8361A. На рис. 3 – 4 приведены частотные зависимости S11 и коэффициента стоячей волны (КСВ), полученные при расчете в FEKO и при измерениях макета антенны.

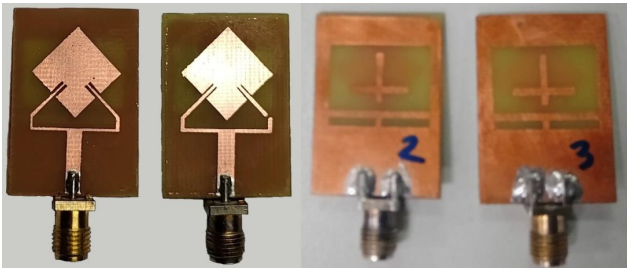


Рис. 2 Макет антенны

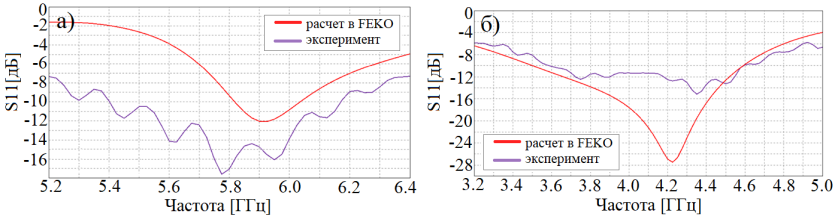


Рис. 3 Зависимость S11 от частоты в режиме 10110 (а) и 11110 (б)

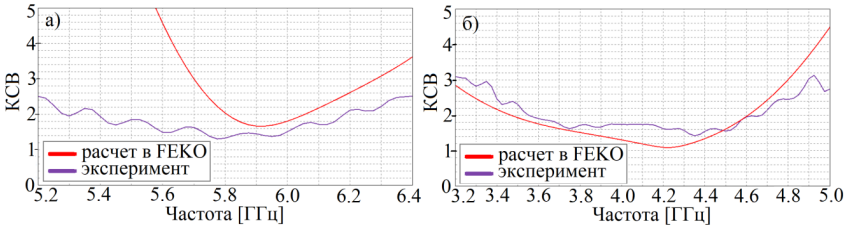


Рис. 4 Зависимость КСВ от частоты в режиме 10110 (а) и 11110 (б)

При расчете в FEKO режима 10110 (рис. 3, а и рис. 4, а, красная линия) минимум S11 получился равным -12 дБ, а минимум КСВ равен 1,7. Эти значения достигаются на частоте 5,9 ГГц. Рассчитанный КСВ < 2 в полосе от 5,8 до 6,05 ГГц. При измерении параметров соответствующего этому режиму макета (рис. 3, а и рис. 4, а, фиолетовая линия) на частоте 5,9 ГГц получены значения S11 = -15 дБ и КСВ = 1,4, что даже лучше рассчитанных значений. Кроме того при измерениях КСВ < 2 достигается в более широкой полосе (5,4 - 6,17 ГГц).

Для режима 11110 (рис. 3, б и рис. 4, б, красная линия) минимальное рассчитанное значение S11 равно -27,5 дБ, а минимальное значение КСВ составляет 1,1. Эти значения достигаются на частоте 4,22 ГГц. Рассчитанный КСВ < 2 в полосе от 3,45 до 4,6 ГГц. Измеренные параметры макета (рис. 3, б и рис. 4, б, фиолетовая линия) в этом случае оказались несколько хуже, однако антенна работоспособна. На частоте 4,22 ГГц S11 = -12,5 дБ и КСВ=1,6,

минимальные же значения S11 = -15 дБ и КСВ=1,4 достигаются на частоте 4,35 ГГц. Полоса, в которой измеренный КСВ < 2, составляет от 3,55 до 4,65 ГГц. Для сравнения данные, полученные при моделировании в FEKO и при экспериментальном измерении параметров антенны, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры антенны в различных режимах работы

Режим		Резонансная частота	S11	КСВ	Полоса КСВ < 2
10110	FEKO	5,9 ГГц	-12 дБ	1,7	0,25 ГГц
	Эксперим.	5,9 ГГц	-15 дБ	1,4	0,77 ГГц
11110	FEKO	4,22 ГГц	-27,5 дБ	1,1	1,15 ГГц
	Эксперим.	4,22 ГГц	-12,5 дБ	1,6	1,1 ГГц

Выводы

Анализ результатов показывает, что полученные при моделировании в FEKO и при экспериментальном измерении величины S11 и КСВ на резонансной частоте достаточно близки. Полученные различия могут объясняться недостаточной точностью изготовления макета, а также тем, что вместо pin-диодов использовались металлические перемычки. Основываясь на результатах проведенного эксперимента можно заключить, что рассчитанные с помощью FEKO параметры антенны [9 – 11] также достаточно близки к тому, как она будет работать в реальности. Таким образом, подтверждена правильность моделирования и возможность использования антенны данной конструкции в диапазоне 2 - 7 ГГц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Haupt R. L., Lanagan M. Reconfigurable antennas // IEEE Antennas Propag. Mag. 2013, vol. 55(1), pp. 49–61.

2. Han L., Wang C., Chen X., et al. Compact frequency–reconfigurable slot antenna for wireless applications // IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett. 2016, vol.15, pp. 1795–1798.

3. Hassan M. M., Zahid Z., Khan A. A., Rashid I., Rauf A., Maqsood M. Two element MIMO antenna with frequency reconfigurable characteristics utilizing RF MEMS for 5G applications // Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol. 34, 2020 - Issue 9: Massive MIMO Toward 5G. pp. 1210-1224.

4. Borhani M., Rezaei P., Valizade A. Design of a Reconfigurable Miniaturized Microstrip Antenna for Switchable Multiband Systems // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 15, 2016, pp.822-825.

5. Song T., Lee Y., Ga D., Choi J. A Polarization Reconfigurable Microstrip Patch Antenna using PIN Diodes // Proceedings of APMC 2012, Kaohsiung, Taiwan, Dec. 4-7, 2012, pp. 616-618.

6. Lee S. W., Sung Y., Lee S. J., Yoon H. S. and Park H. J. A reconfigurable patch antenna with symmetrical structure for polarization diversity // 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 13-17 April 2015, Lisbon, Portugal.

7. Ji L. Y., Qin P. Y., Guo Y. J., Fu G., Mittra R. A Wideband Polarization Reconfigurable Antenna for WLAN Applications // 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 10-15 April 2016, Davos, Switzerland.

8. Roseli W. I., Moktar N. H., Ali M. T. Polarization Reconfigurable Microstrip Patch Antenna for Wireless Communication Applications // 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Busan, Korea (South), 23-26 Oct. 2018.

9. Ваганова А.А., Панычев А.И., Кисель Н.Н. Исследование поляризации излучения реконфигурируемой микрополосковой антенны // Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (Комтех-2021)»: в 2 т., Ростов-на-Дону; Таганрог, Издательство Южного федерального университета, 2021. Т.1. – С. 9 — 15.

10. Ваганова А.А., Кисель Н.Н., Панычев А.И. Направленные и поляризационные свойства микрополосковой реконфигурируемой антенны, перестраиваемой по частоте и поляризации // Известия ЮФУ. Технические науки, № 2, 2021. – С. 74 — 83.

11. Vaganova A.A., Kisel N.N., Panychev A.I. Microstrip reconfigurable antenna with tunable frequency and polarization // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves RSEMW, June 28 - July 2, 2021, Divnomorskoe, Russia.

12. Банков С. Е., Грибанов А. Н., Курушин А. А. Электродинамическое моделирование антенных и СВЧ структур с использованием FEKO. – М.: One-Book, 2013. – 423 с.

Авторы:

Ваганова Анастасия Алексеевна, ассистент, Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, г. Таганрог, Россия, email: vaganova@sfedu.ru.

Кисель Наталья Николаевна, к.т.н., доцент, Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, г. Таганрог, Россия, email: nnkisel@sfedu.ru.

Панычев Андрей Иванович, к.т.н., доцент, Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, г. Таганрог, Россия, email: aipanychev@sfedu.ru.

Authors:

Vaganova A.A., assistant, Institute of Radio Engineering Systems and Control, Southern Federal University, Taganrog, Russia, email: vaganova@sfedu.ru.

Kisel N.N., candidate of technical sciences, associate professor, Institute of Radio Engineering Systems and Control, Southern Federal University, Taganrog, Russia, email: nnkisel@sfedu.ru.

Panychev A.I., candidate of technical sciences, associate professor, Institute of Radio Engineering Systems and Control, Southern Federal University, Taganrog, Russia, email: aipanychev@sfedu.ru.

УДК 681.396

Фархуд Азхар Кадим, Абу Хамдан Низар

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

Аннотация. В данной статье нейронная сеть глубокого обучения использована для решения навигационной задачи мобильного робота. Сеть представляет собой классификатор среды на 8 классов. Использовано супервизорное обучение. В качестве учителя, генерирующего эталонную траекторию движения применен известный алгоритм D. Данная проблема планирования пути в настоящее время решается различными сетями глубокого обучения. В данной работе выбрана сверточная нейронная сеть, (CNN), т.к. она способная выбирать необходимое действие непосредственно на основе входных изображений, используя архитектуру свертки 2D слоев (CNN). Сверточная нейронная сеть анализирует ситуацию на основе помощи карты размером 50x50. Такая карта формируется на каждом шаге движения системой технического зрения робота.*

*Ключевые слова: сверточные нейронные сети (CNN), навигация мобильных роботов, алгоритм D**

Azhar kadhim Farhood, Nizar Ahmad Abou Hamdan

DESIGN ARCHITECTURE OF THE CNN FOR MOBILE ROBOT NAVIGATION

Annotation. Deep learning has been used for solving the mobile Robot Navigation Task through the 8-classes control. The 8-classes control involves the movement of the mobile robot. The path of a movement is measured by D algorithm. Many deep learning methods have been used for this problem, as classifiers, but Convolution Neural Networks (CNN), The trained neural network architecture is capable of choosing an action directly based on the input images using the convolution 2D layers (CNN) architecture. A convolution neural network analyzes the exact situation using maps50x50 information on its environment and the mobile robot navigates based on the situation analyzed through Deep learning.*

Keywords. Convolution Neural Networks (CNN), mobile robot navigation, D algorithm 8-classes*

Как известно, робот – это автоматически работающая машина, которая может выполнять некоторые задачи, решаемые человеком. Мобильный робот специально разработан для работы в таких средах, как автоматизированные сборочные цеха, заводы или склады [1]. Отличительной особенностью роботов является наличие системы планирования, которая сегодня может использовать нейронные сети глубокого обучения. Сети глубокого обучения широко используются в задачах распознавания текста [2] и объектов [3], в навигации [4], для понимания сцен [5] и использования изученных паттернов в других

областях [6]. Перспективными направлениями развития нейросетевых систем являются исследования, связанные с технологиями глубокого обучения и самообучения с подкреплением и использованием баз знаний и программ логического вывода, апостериорного обучения. В системах автоматического управления нейронные сети используются в качестве адаптивных регуляторов, идентификаторов и планировщиков траекторий. Устойчивость и обучение нейронных сетей являются исключительными и наиболее важными вещами в этих системах. Статья [7] представляет алгоритм обучения динамических рекуррентных нейронных сетей Элмана, основанный на оптимизации частиц в рое. В ней разработан новый метод управления, в котором динамический идентификатор позволяет идентифицировать частоту вращения ультразвукового двигателя. Мобильная система имеет реализованную возможность перемещения на нужное расстояние в прямом или обратном направлении, но движение по своей сути неопределенно, поэтому используется нейросетевой алгоритм планирования траектории в неопределенных 2D-средах. В результате проведенного сравнительного анализа была показана высокая эффективность нейронной сети при решении задач планирования траектории движения [8]. В статье [9] предложена нейронная сеть для идентификации обратной динамики дискретного объекта. Это позволяет придать системе управления прогностические свойства. В данной работе используется свертка 2D слоев нейронных сетей, которые применяются для решения многих сложных задач, где машина сама попытается изучить задачу, при условии, что у нее достаточно данных. Основная задача, выявленная в этой работе, состояла в том, чтобы контроллер нейронной сети (NN) не имел памяти о прошлых действиях, которые он совершил, и о прошлом состоянии мира, в результате чего не было обнаружено столкновений. Варианты устранения этой проблемы разработаны архитектурными решениями.

Постановка задачи

Рассматривается мобильный робот в 2-D среде. Математическая модель мобильного робота описывается следующим образом [10, 11].

$$\dot{y}_i\left(t\right) = R\left(y_i\right)x_i\,. \tag{1}$$

$$M_i\dot{x}_i\left(t\right) = B_i u_i + F_{di}\,. \tag{2}$$

когда $y_i=[y_{1i}\ y_{2i}\ y_{3i}]^{\mathrm{T}}$ -вектор положения (y_{1i}, y_{2i}) и ориентации (y_{3i}) подвижного робота в неподвижной системе координат, $O_gY_{g1}Y_{g2}$ (рис. 1), $x_i=[x_{1i}\ x_{2i}\ x_{3i}]^{\mathrm{T}}$ - вектор линейных (x_{1i}, x_{2i}) и угловых (x_{3i}) скоростей подвижного робота в движущейся системе координат, OY_1Y_2, $R(y_i)$ - матрица кинематики, M_i - матрица инерции, F_{di} -вектор динамических сил, u_i –вектор управляющих воздействий, B_i -входная матрица.

Навигационная система робота измеряет векторы y_i и x_i.

Среда моделирования, которую мы приняли в этом эксперименте, представляет собой дискретную карту 50*50 квадратных ячеек, как мы можем видеть на рис.2. Среда включает до 12 произвольно расположенных препятствий.

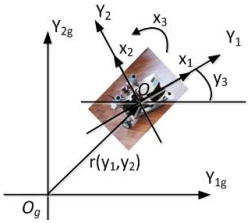


Рис. 1 Неподвижные и подвижные системы координат робота

Начальное положение робота обозначается синим кружком, а конечное – синей звездой. Путь, проложенный алгоритмом D* (алгоритм поиска кратчайшего пути) показан синей пунктирной линией, а препятствия – красными квадратами. В данной статье алгоритм D* используется в качестве учителя, который позволяет мобильному роботу самостоятельно учиться на своем опыте, с учетом математической модели мобильного робота, представленной уравнениями (1) и (2). Результаты моделирования робота (1) и (2) вместе с обученной сетью используются для обновления параметров нейронных сетей планирования траектории. Входным сигналом нейронного блока является карта среды и траектории, разработанная алгоритмами D*.

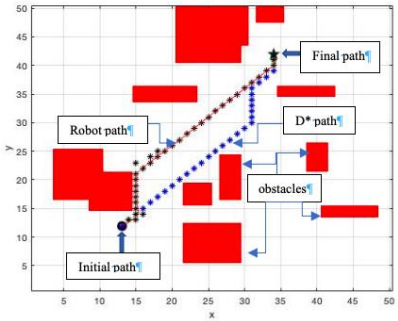


Рис. 2 Среда обучения робота

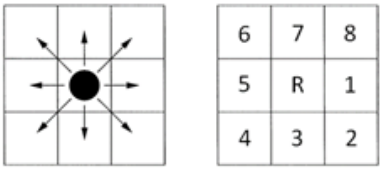


Рис. 3 Классификация соседних с роботом ячеек

Ситуация классифицируется алгоритмом D* на девять классов. При планировании по D * путь проходит через ячейку с номером N=1,2,...8 (рис. 3), поэтому класс состояния равен N. Если пути от текущего местоположения до целевого местоположения робота не существует, то класс состояния равен 9.

Задачей нейронной сети является прокладка пути и избегание столкновений. Решение этой проблемы делится на два этапа. Первый этап – это базовый тренинг, выполняемый D * супервизором. Второй этап – это заключительная тренировка, выполняемая методом подкрепляющего обучения.

Разработка процедуры обучения

Изучение алгоритма развития обучающего комплекта. В ходе исследований проведено пять итераций обучения, результаты которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты итерационного обучения нейронной сети

Итерация	Объем выборки		Оценка точност %	Частота успешн достижения '
1	1000		67%	
2	2000	Фильтрованна:	72%	42%
		Обычная	79%	51%
3	3000	Фильтрованна:	73%	51%
		Обычная	80%	53%
4	4000	Фильтрованна:	72%	45%
		Обычная	81%	56%
5	5000	Фильтрованна:	68%	59%
		Обычная	84%	53%

Представлена 2D-сеть для обработки изображений размером h×w×r, где r обозначает количество каналов. Для цветных изображений это число равно 3. Сеть включает сверточные и вспомогательные уровни, которые заканчиваются полносвязными слоями. Размер фильтров в этих слоях составляет h×w×q, где h – высота изображения, w – ширина, q может быть равно r или меньше. Размер используемой карты – 50x50 пикселей. На первом этапе подготовлена выборка из 1000 изображений. Эти изображения использовались для обучения сети, состоящей из нескольких слоев: входного слоя, пяти скрытых сверточных слоев, трех скрытых полносвязных слоев и выходного слоя. Первый сверточный слой содержит 32 фильтра размером 3×3 пикселя с шагом 2. Второй и третий сверточные слои также содержат по 64 фильтра размером 3×3 с шагом 2. Четвертый и пятый сверточные слои имеют по 128 фильтров размером 3×3. Есть три полносвязных слоя с 32, 16 и 8 нейронами соответственно. Все скрытые слои используют функцию активации ReLU, которая ускоряет обучение. Параметры обучения включают используемый алгоритм оптимизации (sgdm), максимальное количество эпох (MaxEpochs) и минимальный размер обучающей выборки (MiniBatchsize). Оптимальные параметры настройки выбраны из научных исследований [11,12].

Сеть обучена на первой выборке. Далее обученная сеть использована для увеличения обучающей выборки. Проводилось моделирование движения робота с обученной нейронной сетью. Если робот в какой-либо точке допускает коллизию, то такая карта добавляется в обучающую выборку. В противном случае ситуация не добавляется в обучающую выборку. Такая процедура фильтрации использована для увеличения обучающей выборки до 5000 изображений. При этом полученная оценка точности при обучении составила 68 % для выборки с фильтрацией и 84 % для выборки без фильтрации. Однако, моделирование показало, что частота успешного достижения цели составила 59 % для фильтрованной выборки и 53 % для обычной выборки.

Эффективность фильтрации можно значительно улучшить, добавляя в выборку не только точку коллизии, но и всю траекторию. Это повышает точность обучения и эффективность достижения цели.

Результаты обучения нейронной сети представлены на рис. 4 и 5.

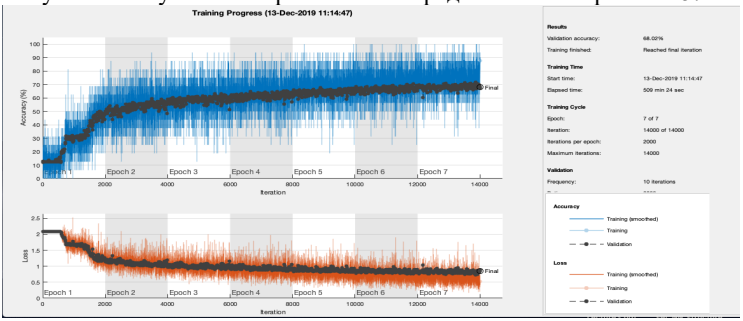


Рис. 4 Обучение сети фильтрованной выборкой

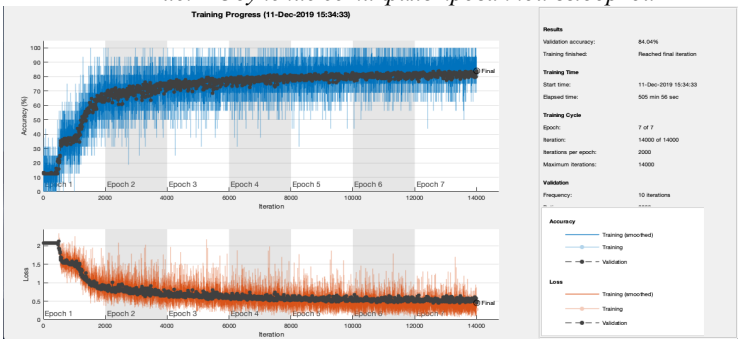


Рис. 5 Обучение без фильтрации

Вывод

В данной работе приводятся предварительные результаты работы сверточной 2D нейронной сети (NN1), обученной без какой-либо предварительной настойки. Это позволяет обучить мобильного робота успешно избегать препятствий, за счет использование специально отфильтрованных изображений позволяют исправлять любые ошибки. Обучение произведено на маломощном ноутбуке (MacBook Air) с графическим процессором. Т.к. нейронная сеть выбирает только направление движения и скорость движения, то она работает быстрее алгоритма D*, который строит весь путь. Кроме того, время решения задачи нейронной сетью является фиксированным.

В дальнейшем планируется развитие работы путем изменения процедуры фильтрации (добавление всей траектории в обучающую выборку), увеличение размера робота и целевой точки для повышения качества работы сверточной сети и планирование участка траектории за счет использования аппроксимирующей нейронной сети.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sandip K. S. Data – Enhanced Convolution Network for Wall Following Navigation,2019, IJEAT

2. Kim Y. Convolutional Neural Networks for Sentence Classification. Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP 2014), (2014). P. 1746–1751.

3. Angelova A., Krizhevsky A., Vanhoucke V. Pedestrian detection with a Large-Field-Of- View deep network. IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2015.

4. Engel J., Schöps T., Cremers D. LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM. Lecture Notes in Computer Science, 2014. Vol 8690.

5. Zhu J., Park T., Phillip Isola, and Alexei A. Efros. "Unpaired Image-to-Image Translation using Cycle-Consistent Adversarial Networks", in IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2017.

6. Gholami B., Rudovic O., Pavlovic V. Probabilistic Unsupervised Domain Adaptation for Knowledge Transfer Across Visual Categories. The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2017, Pp. 3581-3590.

7. GuzikV.,PereverzevV.,PyavchenkoA.,SaprykinR.,Pshikhopov,V.NeuralNet working Path Planning Based on Neural-Like Structures. Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments, 2017. Elsevier, Butterworth Heinemann.

8. NotkinB.Neuralnetworkidentificationoftheinversedynamicsofanobjectfordesi gnof predictive control system. In Proc. of the 4-th International conference SICPRO'05. 2005. Moscow.

9. Pshikhopov V., Medvedev M. Position-Path Control of a Vehicle // Path Planning for Vehicles Operating in Uncertain 2D Environments. Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2017. Pp. 1–23.

10. Pshikhopov V., Medvedev M. Mobile Objects Control in Three-Dimensional Area Using the Hybrid Decentralized Algorithm // 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT. 2018, pp. 452-457.

11. https://ch.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainingoptions.html

12. V. Nair, G.E. Hinton, “Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines,” Proc. of the ICML, 2010

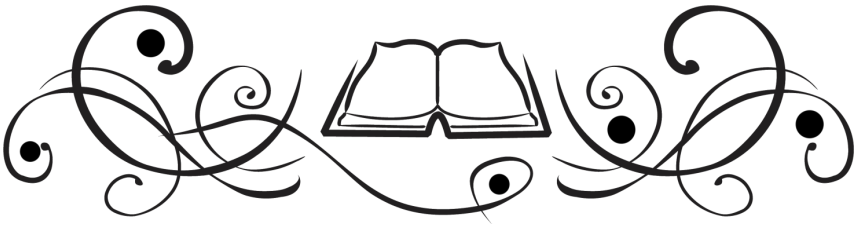
Автор: Фархуд Азхар Кадим, кандидат технических наук, 64001, Ирак, город Насирия, улица Багдад, телефон: +9647905233421, email: azhar.kadhum@stu.edu.iq .

Author: Azhar kadhim Farhood, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.) of Engineering, Iraq, Nasiriyah, Baghdad street pho, ne: +964790523342, email: azhar.kadhum@stu.edu.iq

Автор: Абу Хамдан Низар Nizar, аспирант, Ливан, Захле г., Хеззерта, телефон: +7 (9508) 68-90-86, email: dr.nizar.abou.hamdane@gmail.com

Author: Ahmad Abou Hamdan, Postgraduate student, Lebanon, Zahle city, Hezzerta, phone: +7 (9508) 68-90-86, email: dr.nizar.abou.hamdane@gmail.com

Секция
Системы мониторинга, диагностики и управления



УДК 004.056.57

Марков Дмитрий Александрович

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЗАЩИТЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОТ АТАК ВИРУСОВ-ШИФРОВАЛЬЩИКОВ

Аннотация. Анализ организационных мер по защите информационных систем от вирусов-шифровальщиков. Рассмотрены ключевые подходы к минимизации угроз, включая разработку политики безопасности, обучение сотрудников, резервное копирование данных и внедрение систем мониторинга. Основные результаты показывают, что комплексный подход, сочетающий технические и организационные меры, повышает устойчивость организаций к кибератакам и снижает вероятность успешного заражения.

Ключевые слова: вирусы-шифровальщики, защита данных, политика безопасности, резервное копирование, мониторинг безопасности.

Markov Dmitry Alexandrovich

ORGANIZATIONAL MEASURES TO PROTECT INFORMATION SYSTEMS FROM ATTACKS BY RANSOMWARE VIRUSES

Abstract. Analysis of organizational measures for protecting information systems from ransomware attacks. Key approaches to threat mitigation are examined, including security policy development, employee training, data backup, and the implementation of monitoring systems. The main findings indicate that a comprehensive approach combining technical and organizational measures enhances organizational resilience to cyberattacks and reduces the likelihood of successful infection.

Keywords: ransomware, data protection, security policy, data backup, security monitoring.

Введение

Атаки вирусов-шифровальщиков по-прежнему представляют серьёзную угрозу для информационных систем компаний. Эти вирусы блокируют доступ к данным, шифруя их, и требуют выкуп для восстановления. В результате таких атак организации нередко несут значительные финансовые потери, а иногда и полностью прекращают свою деятельность.

Свежий пример — атака на логистическую компанию СДЭК в мае 2024 года [4]. Вирус-шифровальщик заблокировал её систему, что привело к временному прекращению работы. Хакерская группа Head Mare взяла на себя ответственность за взлом и потребовала выкуп, опубликовав доказательства атаки. Этот случай подчёркивает необходимость надёжной защиты информационных систем от подобных угроз.

Хотя технические меры защиты важны, организационные аспекты также играют значимую роль. Они помогают минимизировать последствия атак, укрепить безопасность и повысить осведомлённость сотрудников. В их числе — разработка политики безопасности, обучение персонала, планирование резервного копирования и внедрение постоянного мониторинга.

1. Создание и внедрение политики безопасности

Разработка политики безопасности — один из первых шагов к защите от вирусов-шифровальщиков. Чёткая и детализированная политика помогает всем сотрудникам понять свою роль в обеспечении безопасности. Политика должна включать следующие элементы:

- *Контроль доступа*: контроль доступа включает в себя ограничение прав пользователей на основе их ролей и обязанностей, что снижает риск случайного или умышленного нанесения ущерба критически важным данным. Этот подход помогает защитить данные и системы от злоупотреблений со стороны сотрудников или злоумышленников, которые могут получить доступ к учётным записям.

- *Управление паролями*: управление паролями является важным элементом защиты от несанкционированного доступа. Для обеспечения безопасности необходимо внедрить политику, которая включает строгие требования к созданию паролей, их регулярное обновление и использование многофакторной аутентификации.

- *Правила безопасного использования интернета и электронной почты*: Правила безопасного использования интернета и электронной почты помогают защитить компанию от проникновения вирусов и фишинговых атак. Эти меры включают установление четких инструкций по безопасной работе в интернете и с электронной почтой, чтобы сотрудники знали, как распознавать потенциальные угрозы и избегать опасных ситуаций.

Анализ влияния на вирусы-шифровальщики: Политика безопасности позволяет минимизировать риски несанкционированного доступа, который вирусы-шифровальщики могут использовать для распространения внутри системы.

2. Обучение и повышение осведомленности сотрудников

Сотрудники часто считаются слабым звеном в защите информационных систем, но их обучение может существенно уменьшить риски кибератак [5]. Проведение курсов по кибербезопасности и регулярные фишинговые тесты помогают сотрудникам научиться распознавать опасные ситуации и избегать ошибок, которые могут привести к заражению системы.

Повышение осведомлённости сотрудников по вопросам безопасности снижает вероятность случайных действий, которые могут привести к проникновению вирусов. Обученные сотрудники лучше распознают фишинговые атаки и избегают опасных сайтов и приложений, что помогает в борьбе с вирусами-шифровальщиками.

Анализ влияния на вирусы-шифровальщики: Вирусы-шифровальщики часто проникают в системы через фишинговые письма и заражённые вложения. Регулярное обучение сотрудников и тесты на киберугрозы повышают их осведомлённость, что помогает выявлять угрозы на ранних стадиях и предотвращать их распространение.

3. Обеспечение резервного копирования данных

Резервное копирование данных — это одна из важнейших мер защиты, особенно в случае атак вирусов-шифровальщиков. Оно позволяет восстанавливать доступ к данным без необходимости уплаты выкупа и минимизирует финансовые потери. Давайте подробнее разберем, зачем необходимо резервное копирование, как часто его следует проводить, какие методы хранения использовать, и как правильно тестировать резервные копии.

Частота резервного копирования

Частота копирования должна соответствовать потребностям компании:

- Ежедневное резервное копирование подходит для большинства организаций, особенно если данные критически важны.

- Частое копирование, например, раз в несколько часов или в режиме реального времени, необходимо для организаций с высокой интенсивностью операций, таких как финансовые учреждения.

В компании с интенсивным оборотом данных может быть настроено инкрементное резервное копирование раз в час. Это позволяет при необходимости восстановить данные с минимальными потерями.

Методы хранения резервных копий

Для надёжного хранения копий используют несколько методов:

1. Физическое хранение.
2. Облачное хранение.
3. Гибридное хранение.

Тестирование резервных копий

Резервные копии необходимо регулярно тестировать, чтобы убедиться в их работоспособности и корректности. Многие компании проводят ежемесячное тестирование, включая выборочное восстановление данных и проверку на предмет целостности. Это гарантирует, что данные можно будет восстановить в случае атаки.

Принципы эффективного резервного копирования: *правило 3-2-1 [6]*

Для повышения надёжности резервного копирования рекомендуется придерживаться правила 3-2-1:

- 3 копии данных: Оригинал и две резервные копии.

- 2 разных носителя: например, один — на локальном сервере, другой — в облаке.

- 1 копия вне офиса: Удалённая копия защитит данные от физических угроз, таких как пожар или кража.

Анализ влияния на вирусы-шифровальщики: Резервное копирование минимизирует последствия атак вирусов-шифровальщиков, так как позволяет восстановить данные из резервных копий.

4. **Внедрение систем мониторинга событий информационной безопасности**

В современном мире при организации мероприятий по защите от киберугроз важно использовать системы для мониторинга и анализа событий, связанных с безопасностью, что помогает обнаруживать и реагировать на потенциальные угрозы, такие как вирусы-шифровальщики.

Крупные компании используют системы мониторинга событий информационной безопасности (SIEM-платформы), такие как Splunk, IBM QRadar (зарубежные) и Solar Dozor, СёрчИнформ SIEM (российские) [7]. Эти системы собирают и анализируют данные из множества источников — от сетевых устройств и серверов до баз данных и приложений. SIEM-системы помогают выявлять аномальные активности и потенциальные угрозы, объединяя данные с разных уровней инфраструктуры. Подробнее остановимся на каждой:

Splunk

Splunk — это мощная платформа для мониторинга и анализа больших объёмов данных, включая логи событий безопасности. Splunk собирает, индексирует и анализирует данные в реальном времени, что позволяет быстро выявлять аномалии и потенциальные угрозы.

IBM QRadar

IBM QRadar — ведущая SIEM-платформа, используемая для обнаружения и анализа киберугроз. QRadar интегрируется с сетевыми устройствами, серверами, базами данных и приложениями, что обеспечивает глубокий анализ событий в режиме реального времени. Система автоматически распознаёт подозрительные активности, такие как массовое шифрование данных или нестандартное поведение пользователей.

Solar Dozor

Solar Dozor — это российская система контроля событий безопасности, обеспечивающая мониторинг и анализ инцидентов. Она интегрируется с другими системами и устройствами, создавая централизованный обзор состояния безопасности. Solar Dozor позволяет быстро выявлять аномалии и отправлять уведомления при обнаружении подозрительных событий.

СёрчИнформ SIEM

СёрчИнформ SIEM — ещё одна российская платформа для мониторинга и анализа событий информационной безопасности. Она поддерживает интеграцию с различными источниками данных и централизованное управление инцидентами. Система анализирует логи событий и обнаруживает аномалии, такие как нестандартные входы или подозрительные изменения конфигурации.

Сравнительный анализ SIEM-систем показывает, что выбор конкретной платформы должен зависеть от масштаба организации, специфики её деятельности и требований к безопасности.

Анализ влияния на вирусы-шифровальщики: SIEM-системы способны выявлять потенциальные попытки внедрения вирусов-шифровальщиков, отслеживая резкие изменения в поведении сети, такие как

массовый доступ к файлам или аномалии трафика. Это даёт возможность вовремя предотвратить распространение угрозы.

5. Контроль и аудит систем безопасности

Контроль и аудит систем безопасности — это важный элемент защиты информационных систем, который позволяет обнаруживать уязвимости, проверять эффективность мер безопасности и устранять недостатки. Регулярный аудит помогает организациям поддерживать высокий уровень защиты в условиях постоянно меняющихся угроз. Рассмотрим основные аспекты контроля и аудита:

Контроль и аудит систем безопасности позволяют:

- Выявлять уязвимости до того, как их смогут использовать злоумышленники, и принимать проактивные меры для защиты данных.
- Оценивать эффективность мер безопасности и корректировать их при необходимости.
- Обеспечивать соответствие нормативным требованиям, которые требуют регулярных проверок безопасности.
- Повышать осведомленность команды безопасности о текущем состоянии системы и улучшать культуру безопасности в компании [8].

Основные методы контроля и аудита

1. Пенетрационное тестирование:
2. Анализ логов и событий:
3. Аудит безопасности конфигураций:
4. Внешний и внутренний аудит:
5. Мониторинг соответствия политике безопасности:

Регулярный аудит и контроль помогают поддерживать высокий уровень защиты и выявлять уязвимости, прежде чем их смогут использовать злоумышленники. Эти меры позволяют оперативно обновлять и усиливать защиту от новых угроз.

Анализ влияния на вирусы-шифровальщики: Контроль и аудит помогают выявлять слабые места в системе безопасности, которые могут быть использованы для внедрения вирусов-шифровальщиков.

Заключение

Защита информационных систем от атак вирусов-шифровальщиков требует комплексного подхода, сочетающего как технические, так и организационные меры. Организационные мероприятия играют ключевую роль, поскольку они не только помогают предотвратить угрозы, но и повышают осведомленность сотрудников, обеспечивая общую культуру безопасности в организации. Создание чёткой политики безопасности, регулярное обучение персонала, обеспечение резервного копирования, внедрение систем мониторинга и аудит мер безопасности — всё это способствует повышению устойчивости компании к кибератакам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Андреева Е.В. Рекомендации по защите информационных сетей от атак вирусов-шифровальщиков, использующих уязвимость CVE-2017-0144 // [Журнал]. – 2018. – Том 8, № 4. – С. 5-8.

2. Цибуля А.Н., Фадеев В.В. Методика обнаружения и анализа индикаторов компрометации системы, возникающих в ходе проведения атак вирусов-шифровальщиков // Информационная безопасность и защита персональных данных. Проблемы и пути их решения: материалы XII Межрегиональной научно-практической конференции / Под ред. О.М. Голембиовской, М.Ю. Рытова. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2020. – С. 156-159.

3. Якаева А.В., Петренко С.А., Маковейчук К.А. Способ обнаружения атак вирусов-шифровальщиков MAZE (ChaCha), CONTI (IOCP Ransomware), REVIL (Sodin, Sodinokibi) на СУБД Microsoft SQL на основе решающих деревьев // Информационные системы и технологии в моделировании и управлении: сборник трудов VII Международной научно-практической конференции / Отв. ред. К.А. Маковейчук. – Симферополь: ООО «Издательство Типография „Ариал“», 2023. – С. 29-32.

4. Хакеры атаковали СДЭК [Электронный ресурс] // Lenta.ru. – 28 мая 2024. – Режим доступа: [https://lenta.ru/news/2024/05/28/hakery-atakovali-sdek/] (дата обращения: 16.02.2025).

5. Обучение сотрудников основам кибербезопасности [Электронный ресурс] // Kaspersky. – Режим доступа: [https://www.kaspersky.ru/resource-center/preemptive-safety/cybersecurity-training (дата обращения: 18.02.2025).

6. Правило копирования данных [Электронный ресурс] // Habr. – Режим доступа: [https://habr.com/ru/companies/veeam/articles/188544/] (дата обращения: 17.03.2025).

7. Сравнение SIEM-систем [Электронный ресурс] // PickTech. – Режим доступа: [https://picktech.ru/catalog/siem-software/compare/syerchinform-siem-vs-solar-dozor/] (дата обращения: 18.02.2025).

8. Как провести аудит [Электронный ресурс] // Hanston.ru. – Режим доступа: [https://hanston.ru/press-centr/kak- provesti-audit-tehnicheskoj-sistemy-bezopasnosti-svoej-kompanii/] (дата обращения: 19.02.2025).

9. И.А. Радченко, И.Н. Николаев Технологии и инфраструктура BIG DATA / Санкт-Петербург. ИТМО. 2018 с.50;

10. А.Р. Хромова, Л.Э. Петросян Анализ уязвимостей в системах безопасности данных / Инженерный вестник Дона. №6. 2023. с 10;

Автор: Марков Дмитрий Александрович, аспирант 2-го курса ИКТИБ Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Чехова 2, 347922, телефон: +7 (921) 409-12-68, email: markovv.da@gmail.com.

Author: Dmitry Alexandrovich Markov, 2nd year postgraduate student at the Southern Federal University's Institute of Computer Technology and Information Security, Taganrog, Russia, 347922, Chekhova Street 2, phone: +7 (921) 409-12-68, email: markov[illegible]

УДК 004.4, 004.056.55

Эмилбек уулу Арслан, Кадыркулова Кыял Кудайбердиевна, Иманакунова Нуржан Тилековна

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Целью данной работы является разработка системы контроля доступа с использованием отпечатков пальцев на базе Arduino. Система включает сканер отпечатков, сравнивающий введённые данные с локальной базой. При совпадении срабатывает электрозамок, обеспечивая доступ; при несоответствии — доступ блокируется.

Решение ориентировано на школы, общежития и офисы, где требуется надёжная идентификация. В отличие от карт и кодов, биометрия исключает возможность подделки, что повышает уровень безопасности.

Система отличается простотой, надёжностью и доступной стоимостью, а также возможностью масштабирования под большее количество пользователей. Проведённые испытания подтвердили стабильную работу всех компонентов.

Биометрия, отпечаток пальца, доступ, сканер, идентификация, система, микроконтроллер, arduino, контроль, автоматизация .

Emilbek uulu Arslan, Kadyrkulova Kyial Kudayberdievna, Imanakunova Nurjan Tilekovna

DEVELOPMENT OF AN ACCESS CONTROL AND MANAGEMENT SYSTEM USING BIOMETRIC DATA

The aim of this work is to develop a fingerprint-based access control system using Arduino. The system includes a fingerprint scanner that compares input data with a local database. If a match is found, an electric lock is triggered to grant access; otherwise, access is denied.

This solution is intended for use in schools, dormitories, and offices where reliable identification is required. Unlike cards or PIN codes, biometric data cannot be faked or shared, which increases security.

The system is simple, reliable, and cost-effective, with the potential for scaling to support more users. Testing confirmed stable operation of all components.

*B*iometrics, fingerprint, access, scanner, identification, system, microcontroller, Arduino, control, automation .

В условиях роста требований к безопасности в образовательных учреждениях, офисах и жилых комплексах традиционные методы контроля доступа — механические замки, ключи, карты и PIN-коды — становятся всё менее эффективными из-за риска копирования, утери и взлома.

Биометрические технологии, в частности идентификация по отпечаткам пальцев, предлагают надёжное и удобное решение за счёт уникальности биометрических данных и бесконтактного способа доступа. Такие системы снижают влияние человеческого фактора и обеспечивают высокий уровень безопасности.

С учётом цифровизации в Кыргызстане и внедрения электронных систем учёта, биометрические СКУД становятся актуальными для автоматизации доступа и учёта посещаемости в учебных заведениях и офисах.

Цель данной работы — разработка простой и доступной системы контроля доступа на основе сканера отпечатков пальцев с применением микроконтроллера Arduino, ориентированной на повышение уровня безопасности и автоматизации в организациях.

Система контроля доступа, реализованная на базе микроконтроллера Arduino UNO, предназначена для обеспечения защищённого и удобного входа с помощью биометрической идентификации пользователя по отпечатку пальца. В основе работы системы лежит комплекс аппаратных и программных компонентов, обеспечивающих высокую точность распознавания, информирование пользователя и своевременную реакцию на попытки несанкционированного доступа.

Работа системы строится по следующему алгоритму:

1. Обнаружение пользователя
   Для определения приближения человека к двери используется ультразвуковой датчик HC-SR04. Как только датчик фиксирует присутствие, автоматически активируется LCD-дисплей, который служит интерфейсом для взаимодействия с пользователем.
2. Приглашение к идентификации
   На экране отображается сообщение с приглашением приложить палец к сканеру отпечатков. Это позволяет пользователю подготовиться к процедуре аутентификации, что повышает удобство использования системы.
3. Сканирование отпечатка пальца
   Fingerprint-сенсор выполняет считывание отпечатка и сравнивает его с записями в локальной базе данных. В случае успешного совпадения система подтверждает личность пользователя и разрешает доступ.
4. Успешный вход

   При положительном результате распознавания активируется комплекс визуальных и звуковых сигналов:
   - загорается зелёный светодиод;
   - сервопривод открывает электромагнитный замок, обеспечивая доступ;
   - раздаётся короткий звуковой сигнал подтверждения;
   - на дисплее появляется сообщение «Доступ разрешён»;
5. Ошибка доступа

Если отпечаток пальца не совпадает с базой, система сигнализирует об отказе:

- мигает красный светодиод,
- звучит тревожный звуковой сигнал,
- на экране отображается предупреждающее сообщение «Доступ запрещён».

6. Защита от повторных неудачных попыток

   Для повышения безопасности предусмотрена функция контроля повторных ошибок. При нескольких подряд неудачных попытках аутентификации активируется FM-модуль, который передаёт тревожный сигнал, что позволяет оперативно реагировать на возможные попытки взлома.

Данная структура работы обеспечивает комплексный подход к контролю доступа, сочетая биометрическую точность с удобством и многоуровневой защитой. Использование Arduino UNO позволяет реализовать систему с минимальными затратами, сохраняя при этом высокий уровень надёжности и расширяемости.

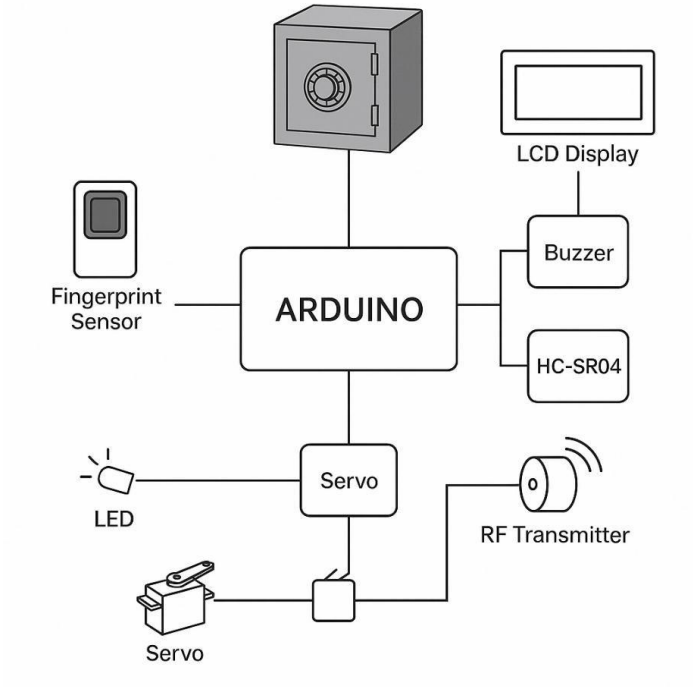


Рис. 1 Структурная схема биометрической системы контроля доступа на базе Arduino

На схеме показаны основные части системы, которую я собрал. В центре – Arduino, он управляет всеми подключёнными компонентами.

Fingerprint Sensor сканирует отпечаток пальца и отправляет его в Arduino. Если отпечаток верный, Servo открывает замок.

LCD Display выводит информацию, например: «Доступ разрешён» или «Ошибка».

Buzzer подаёт звуковой сигнал, чтобы сразу было понятно, что доступ получен или отказан.

LED показывает состояние системы — может мигать или гореть разными цветами.

HC-SR04 — это ультразвуковой датчик, он срабатывает, когда кто-то подходит к двери.

RF Transmitter нужен для тревожных сигналов — например, чтобы включить сигнализацию или передать сообщение на другое устройство.

Эта система удобна, безопасна и может использоваться в школах, офисах или общежитиях.

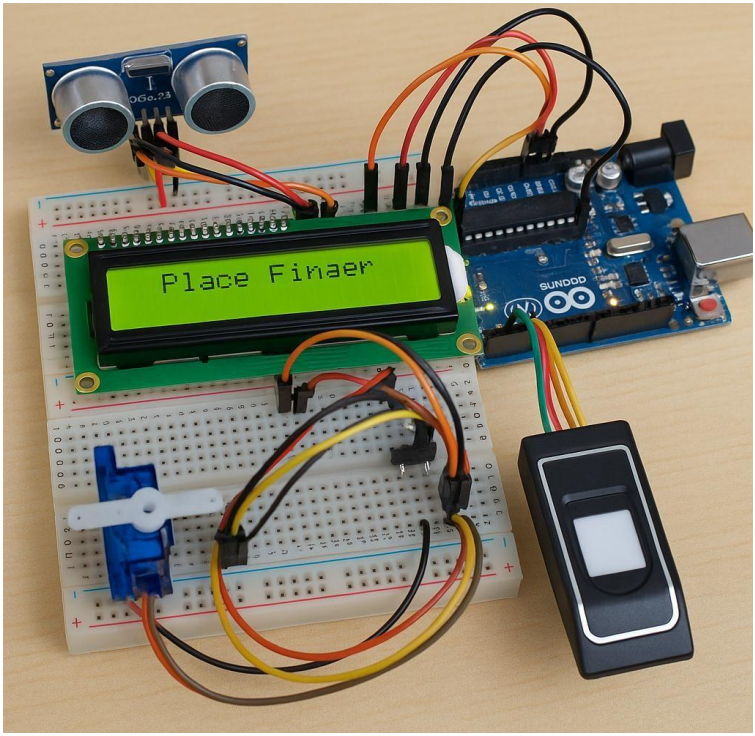


Рис. 2 Биометрическая система контроля доступа на основе Arduino

На рис.2 изображён макет системы управления доступом, собранный на базе Arduino. Компоненты включают: сканер отпечатков пальцев, ЖК-дисплей с надписью «Place Finger», ультразвуковой датчик расстояния, сервопривод, а также макетную плату и соединительные провода. Система предназначена для идентификации пользователя по отпечатку пальца и автоматического управления замком.

Преимущества проекта:

1. Высокий уровень безопасности: биометрия трудно подделать.
2. Автономность: может питаться от аккумулятора или через USB.
3. Многоуровневая защита: обнаружение движения, тревога, визуальные и звуковые сигналы.
4. Простота сборки: использованы общедоступные компоненты Arduino.
5. Обучающий эффект: проект позволяет изучить микроконтроллеры, датчики и электронные схемы.

Возможные улучшения:

1. Добавление Bluetooth или Wi-Fi: для удалённого управления и мониторинга.
2. Реализация SMS-уведомлений через GSM-модуль.
3. Питание от аккумулятора с солнечной зарядкой для автономной работы.
4. Ведение логов доступа (дата, время, пользователь).

Выводы

Разработанная система контроля доступа на основе отпечатков пальцев показала свою надёжность, техническую состоятельность и практическую значимость. Система обеспечивает высокий уровень безопасности, проста в использовании и доступна по стоимости.

Проект можно рекомендовать для внедрения в учебных заведениях, офисах и других объектах с ограниченным доступом, а также для дальнейшей доработки и масштабирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брайонсон М. Биометрические технологии: методы и средства. — М.: Техносфера, 2017.
2. Керри К., Эдвардс Р. Введение в системы контроля доступа. — СПб.: Питер, 2018.
3. Хант Л. Arduino для начинающих. — М.: Диалектика, 2020.
4. Иванов С.Ю. Автоматизация и управление с использованием микроконтроллеров. — М.: Солон-Пресс, 2021.
5. ГОСТ Р 52633.5–2006. Информационные технологии. Биометрия. Общие положения. — М.: Стандартинформ, 2006.

6. Малков А.Н. Системы безопасности и контроля доступа. — М.: РадиоСофт, 2016.
7. Уэйт М. Начинаем программировать на Arduino. — СПб.: БХВ-Петербург, 2019.
8. Журавлёв С.В. Биометрические технологии в системах безопасности. — М.: Горячая линия – Телеком, 2018.

Авторы: Эмилбек у А., студент гр. ИТУ(б)-1-21, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова. 66, 720044, телефон: +996 500202726, email: arsy.emilbekov@gmail.com

Кадыркулова К. К., к.т.н доцент, кафедра автоматическое управление, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова. 66, 720044, телефон: +996 700659057, email: kyiala@kstu.kg

Иманакунова Н. Т. аспирант кафедры автоматическое управление, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова. 66, 720044, телефон: +996 552905929, email: nurzhan.imanakunova@kstu.kg

Authors: Emilbek U.A., student of group ITU(b)-1-21, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Kyrgyz Republic, Bishkek, Ch. Aitmatov Ave. 66, 720044, telephone: +996 500202726, email: arsy.emilbekov@gmail.com

Kadyrkulova K.K., PhD, Associate Professor department of automatic control, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Kyrgyz Republic, Bishkek, 66 Ch. Aitmatov Ave., 720044, telephone: +996700659057, email: kyiala@kstu.kg

Imanakunova N.T. graduate student department of automatic control, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Kyrgyz Republic, Bishkek, Ch. Aitmatov Ave. 66, 720044, telephone: +9960552905929, email: nurzhan.imanakunova@kstu.kg

УДК 004.75

Хлуденев Александр Владимирович

СИНХРОНИЗАЦИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ЧАСОВ В ПЕРИФЕРИЙНЫХ УЗЛАХ СЕТИ SPACEWIRE

В работе рассматривается задача синхронизации времени в узлах распределенных информационно-измерительных и управляющих систем. Предложена реализация синхронизированных виртуальных часов в периферийных узлах сети SpaceWire на основе Time-кодов. Приведено описание экспериментальной установки для исследования распространения Time-кодов в сети SpaceWire. Каждый узел сети выполнен на основе ПЛИС Cyclone. Приведены результаты тестирования при имитации ошибок и потери Time-кодов.

Распределенная информационно-измерительная система, периферийный узел, синхронизация времени, сеть SpaceWire, Time-код, фазовая автоподстройка частоты, рассогласование времени, сложно-функциональный блок.

Alexander Vladimirovich Khludenev

VIRTUAL CLOCKS SYNCHRONIZATION IN SPACEWIRE NETWORK PERIPHERAL NODES

The paper examines the problem of time synchronization in nodes of distributed information-measuring and control systems. The implementation of synchronized virtual clocks in peripheral nodes of the SpaceWire network based on time-codes is proposed. A description of the experimental test bench for the time-codes propagation in SpaceWire network study is given. Each network node is implemented on the Cyclone FPGA. The testing results when simulating errors and loss of time-codes are given.

Distributed information-measuring system, peripheral node, time synchronization, SpaceWire network, time-code, phase locked loop, skew, intellectual property core.

Введение

При построении распределенных информационно-измерительных и управляющих систем, одной из важных проблем является синхронизация показаний времени в отдельных узлах системы. Природа и набор регистрируемых параметров в различных задачах могут отличаться, но время измерения параметров или появления событий обычно относится к числу обязательных. Распределенные системы состоят их набора периферийных узлов, непосредственно связанных с датчиками и исполнительными устройствами, и одного или нескольких центральных узлов, выполняющих сбор и обработку измерительной информации, формирование управляющих воздействий. Узлы системы объединяются в сеть, которая может иметь различную топологию. Проблема синхронизации времени в распределенных информационно-управляющих системах не имеет общепринятого решения в силу разнообразия и специфичности требований [1].

Основная часть

Эффективное решение проблемы синхронизации показаний времени в узлах бортовых систем предоставляет разработчикам применение интерфейса SpaceWire [2]. SpaceWire разрабатывался в соответствии с требованиями к аэрокосмическому оборудованию, но может найти применение в распределенных системах различного назначения. Разработан и введен в действие стандарт SpaceWire-RUS [3]. Технология SpaceWire-RUS является результатом адаптации к национальным особенностям технологии SpaceWire.

В стандарте SpaceWire учтена важность синхронизации времени в системе бортового оборудования. Для поддержания единого системного времени в сети введен специальный управляющий код – Time-код. Один из узлов в сети назначается мастером времени. Он периодически формирует Time-код и передает его в сеть. Time-код образован символом ESC, за которым следует символ данных (рис. 1). Разряды (X_0–X_5) в символе данных кодируют значение относительного системного времени, два старших разряда (X_6–X_7) = 00 являются признаком широковещательного Time-кода.

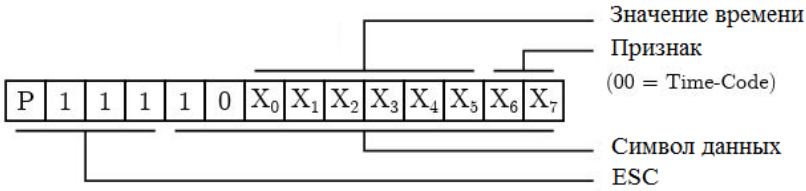


Рис. 1 Time-код

Time-код формируется каждый раз с увеличенным на 1 (по модулю 64) значением системного времени. Специальные дисциплины обеспечивают его трансляцию по всей сети, препятствуя передаче ошибочных Time-кодов. Time-коды имеют высший приоритет и передаются сразу после завершения трансляции текущего символа. Общая задержка их распространения по сети зависит от заданной скорости обмена, числа промежуточных узлов сети и задержек в промежуточных узлах.

Принятые Time-коды используют для выравнивания времени в периферийных узлах сети SpaceWire на основе цифровой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) тактовых генераторов часов [3–5]. Протокол для передачи и синхронизации времени CCSDS Unsegmented Code (CUC) в сетях SpaceWire предоставляет рекомендации по достижению высокоточной синхронизации времени путем снижения джиттера и задержки, влияющих на передачу Time-кода в сети [6]. Протокол также предоставляет рекомендации по снижению дрейфа часов в локальных узлах SpaceWire.

Формальная модель сети SpaceWire с топологией решетка, аналитические оценки задержек распространения Time-кодов и результаты имитационного моделирования в среде DSN Simulator приведены в работе [7].

Принятые Time-коды можно использовать для реализации виртуальных часов в периферийных узлах сети SpaceWire [5]. Передача Time-кода инициируется посредством импульса на линии tick_in порта SpaceWire мастера времени. Получение правильного Time-кода сопровождается импульсом на линии tick_out порта SpaceWire промежуточного или терминального узла сети. Виртуальные часы в периферийном узле можно реализовать на основе счетчика импульсов tick_out, используя принятые Time-коды для коррекции их показаний при необходимости. При условии, что суммарное время распространения Time-кодов до самого удаленного узла сети SpaceWire, а также формирования и передачи пакета сообщения до центрального узла системы менее 64 периодов импульсов tick_in, функцию виртуальных часов может выполнять регистр, в который принятый Time-код загружается по импульсу tick_out.

Для эскизной проработки решений по реализации распределенной системы регистрации параметров случайных событий была использована экспериментальная установка, включающая один центральный и два периферийных узла. Все узлы установки были реализованы на стендах SDK6.1, которые выполнены на ПЛИС семейства Cyclone фирмы Altera. Стенды объединены в сеть SpaceWire с топологией звезда. Для реализации портов сети был использован сложно-функциональный блок (СФ-блок) SpaceWire Light [8], адаптированный для реализации на платформе ПЛИС семейства Cyclone. На физическом уровне порты SpaceWire были выполнены с однопроводными сигнальными линиями, уровни сигналов соответствовали стандарту КМОП 3.3 В. Стенды SDK6.1 были связаны многожильным плоским кабелем FRC-40 через разъемы IDC-40, длина каждого линка составляла 0.6 м.

В СФ-блоке SpaceWire Light обработка полученных Time-кодов не полностью соответствует базовому механизму распространения системного времени [2–3]. На линии tick_out формируется импульс каждый раз при получении любого Time-кода, в то время как стандарт ECSS-E-ST-50-12C определяет, что импульс должен формироваться, только если полученное значение Time-кода на единицу больше, чем предыдущее принятое значение. В проекте периферийных узлов разряды (X_0–X_5) каждого принятого Time-кода по импульсу tick_out сохранялись в регистре Time_h для сравнения со следующим принятым Time-кодом. В регистр виртуальных часов Time_current запись разрядов (X_0–X_5) Time-кода по импульсу tick_out выполнялась при условии

$$(\{\text{Time_h}\} + 1) \bmod 64 = \text{Time_value}, \qquad (1)$$

где {Time_h} - содержимое регистра Time_h; Time_value - значение системного времени в принятом Time-коде.

При тактовой частоте ПЛИС 40 МГц скорость обмена между портами SpaceWire составляла 20 Мбит/с. На ПЛИС центрального узла был реализован мастер времени и регистратор принятых от периферийных узлов пакетов данных. По сигналу события периферийные модули формировали и отправляли пакет данных в центральный узел. Пакет данных из 9 байт включал байт относительного времени регистрации события по показаниям виртуальных часов. Установка устойчиво работала при следовании Time-кодов через 1 мкс [9].

Из-за сбоев нельзя исключить возможность искажения или потери Time-кодов при их доставке к отдельным периферийным узлам сети. Потеря одного Time-кода приведет к кратковременному появлению погрешности показаний времени виртуальных часов [10].

Для экспериментальной проверки поведения установки при потере или получении некорректного Time-кода были внесены изменения в проекты центрального и периферийных узлов. Проверка выполнялась в пошаговом режиме. Центральный узел отправлял очередной Time-код по нажатию кнопки. Ошибка в один разряд Time-кода вносилась переключателем стенда SDK6.1 и транслировалась в один периферийный узел. Принятые периферийными узлами Time-коды и принятый центральным узлом пакет данных отображались на жидкокристаллических индикаторах. Для имитации потери Time-кода при передаче блокировалось формирование импульса tick_out в одном из периферийных узлов.

Результаты тестирования показали, что после однократной потери или однократного получения некорректного Time-кода показания виртуальных часов отстают от актуальных значений в течение двух периодов импульсов tick_in. Корректные показания виртуальных часов восстанавливаются вслед за получением второго после сбоя корректного Time-кода.

Выводы

В распределенных системах, построенных без использования промежуточных узлов (маршрутизаторов) можно использовать Time-коды для создания виртуальных часов в периферийных узлах сети SpaceWire. При этом достоверность относительного системного времени во всех узлах сети будет обеспечиваться при условии, что суммарное время передачи Time-кода до каждого терминального узла, формирования и передачи пакета сообщения от каждого терминального узла до центрального узла системы будет менее 64 периодов сигнала Tick_In.

При следовании Time-кодов с интервалом 1 мкс и скорости обмена между портами SpaceWire 20 Мбит/с рассогласование времени в узлах системы составит 0.7 мкс при разрешающей способности виртуальных часов 1 мкс. Возникающий вследствие различий во времени передачи текущего символа данных или управляющего кода перед передачей Time-кода джиттер составит 0.5 мкс. При однократной потере Time-кода, а также получении некорректного Time-кода рассогласование показаний времени в периферийном узле системы сохраняется в течение двух периодов сигнала Tick_In. Ошибка показаний времени виртуальных часов не будет превышать 3.5 мкс.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковязина Д.Р. Синхронизация времени в распределенных информационно-управляющих системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2007. – Т. 7, № 11. – С. 71–78.

2. ECSSE-ST-50-12C SpaceWire – Links, nodes, routers and networks. – European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2008. – 129 p.

3. ГОСТ Р 70020–2022. Космическая техника. Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов. SpaceWire-RUS. – Введ. 2022–06–01. – М. : Рос. ин-т стандартизации, 2022. – 112 с.

4. Clancy S. C., Shihabi M. M. and Angkasa K. S. Using SpaceWire time codes for spacecraft time synchronization: SpaceWire missions and applications // International SpaceWire Conference, Yokohama, Japan, 2016, P. 1–5.

5. Bahls T., Bihler M. Using SpaceWire Time-codes for Global Synchronization of PLL-Based Local Clocks // International SpaceWire Conference, Long Beach CA, USA, 2018, P. 108–112.

6. Sakthivel A., Ekergarn J., Hellstrom D., Habinc S., Suess M. SpaceWire time distribution protocol implementation and results // International SpaceWire Conference, Vouliagmeni, Greece, 2014, P. 19–25.

7. Коблякова, Л. В. Механизм единого времени в бортовых системах SpaceWire // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 4 (16). – С. 63–71.

8. SpaceWire Light v20110709: Manual. – URL: http://opencores.org/project/spacewire_light (дата обращения 7.05.2025).

9. Хлуденев, А. В. Синхронизация времени в распределенной информационно-измерительной системе // Материалы НТК «Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации». – Уфа: УГАТУ, 2019. – С. 103–108.

10. Koblyakova L., Andreeva S. Stability of the SpaceWire network's time-code mechanism to various failure types // Proc. of the 8th Conf. of Finnish-Russian University Cooperation in Telecommunications. – SPb, Russia, 2010. – P. 68–70.

Автор: Хлуденев Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники и информационно-измерительной техники Оренбургского государственного университета, Россия, город Оренбург, проспект Победы 13, 460018, телефон: +7 (3532) 37-28-74, email: avhludenev@yandex.ru.

Author: Khludenev Alexander Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor, Industrial Electronics and Information Measuring Engineering Department, Orenburg State University, 460018, Russia, Orenburg, 13 Victory Avenue, phone: +7 (3532) 37-28-74, email: avhludenev@yandex.ru.

УДК 004.4, 004.056.55

Маткалыков Медербек Нооманжанович, Иманакунова Нуржан Тилековна,
Кадыркулова Кыял Кудайбердиевна.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СЕРВЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GO

Целью исследования является разработка автономной системы мониторинга серверов Server Pulse, обеспечивающей сбор, анализ и визуализацию метрик в реальном времени с прогнозированием аномалий для оптимизации ресурсов физической инфраструктуры. Проведен анализ ограничений существующих решений (Zabbix, Prometheus), таких как высокая сложность настройки и зависимость от облачных сервисов. Разработана архитектура, включающая агентов на Go, WebSocket для передачи данных, MongoDB для хранения временных рядов, Vue.js для интерфейса и Isolation Forest для машинного обучения. Система собирает логи метрик (CPU, RAM, I/O, NET), выявляет аномалии с точностью 92% и при пиках CPU>90% в течение 3–4 дней рекомендует заказ дополнительных серверов. Тестирование подтвердило задержку обработки менее 1 (сек) и прогнозный горизонт 72 часа.

***Ключевые слова**: мониторинг, автономная система, Go, WebSocket, машинное обучение, MongoDB, прогнозирование аномалий, реальное время, физическая инфраструктура*

Matkalykov Mederbek Noomanzhanovich, Imanakunova Nurzhan Tilekovna,
Kadyrkulova Kyial Kudayberdievna

SERVER MONITORING SYSTEM BASED ON GO

Abstract

The study aims to develop an autonomous server monitoring system Server Pulse for real-time metric collection, analysis, and anomaly prediction to optimize on-premise infrastructure resources. An analysis of existing tools (Zabbix, Prometheus) identified limitations such as configuration complexity and cloud dependency. The proposed architecture includes Go agents, WebSocket for data transmission, MongoDB for time-series storage, Vue.js for the user interface, and Isolation Forest for machine learning. The system logs metrics (CPU, RAM, I/O, NET), detects anomalies with 92% accuracy, and recommends ordering additional servers when CPU usage exceeds 90% for 3–4 days. Testing demonstrated a processing latency of less than 1 (sec) and a 72-hour forecasting horizon.

***Keywords**: monitoring, autonomous system, Go, WebSocket, machine learning, MongoDB, anomaly prediction, real-time, on-premise infrastructure*

Введение

С увеличением объёмов обрабатываемых данных и возрастанием требований к надёжности информационных систем, организации, использующие физическую серверную инфраструктуру, сталкиваются с рядом вызовов в области долгосрочного планирования вычислительных ресурсов. Особенно остро эта проблема проявляется в условиях ограниченного доступа к облачным сервисам, где внедрение масштабируемых решений требует значительных временных и финансовых затрат.

Распространённые инструменты мониторинга, такие как AWS CloudWatch или Datadog, ориентированы преимущественно на облачные среды и не учитывают специфику локальных серверов. В частности, процесс масштабирования в таких условиях предполагает проведение тендерных процедур и закупку оборудования, что может занимать от нескольких недель и более. Согласно данным ITIC, средние потери от простоя серверов составляют около 5600 долларов США в минуту, а для крупных предприятий — от 145 000 до 450 000 долларов в час [10], что подчёркивает необходимость внедрения эффективных автономных решений.

В ответ на указанные вызовы разработана система Server Pulse, представляющая собой автономное решение для мониторинга и прогнозирования состояния серверной инфраструктуры. Её архитектура включает:

- мониторинг на базе Go и WebSocket с минимальной задержкой (менее 1 секунды);
- модуль прогнозирования аномалий с горизонтом до 72 часов и точностью до 92%, что обеспечивает возможность упреждающего управления нагрузкой;
- локальное развертывание без зависимости от внешних облачных API, что существенно повышает уровень безопасности и устойчивости системы.

1. Методы и технологии

Разработанная система опирается на современные методы мониторинга, машинного обучения и передачи данных в реальном времени. Основные используемые технологии включают:

- **Go:** агенты, реализованные на языке Go, осуществляют сбор ключевых метрик (нагрузка на центральный процессор, оперативная память, дисковая и сетевая активность) с помощью библиотеки gopsutil и механизма горутин, обеспечивая низкую нагрузку на ресурсы (менее 1 %CPU).

- Isolation Forest: алгоритм машинного обучения, применяемый для детектирования аномальных значений в многомерных временных рядах. Эффективность модели оценивается значением F1-меры 0.92. Процесс классификации осуществляется по формуле:

$$P(c,\ H)\ =\ \{\frac{None}{sgn(s(c)-threshold)} \quad (1)$$

где P (c, H) - результат предсказания (−1 для аномалии, 1 для нормального значения, None при недостатке данных); c - текущее значение метрики; H - набор исторических значений; s(c) - аномальный счёт для c; threshold -порог, определяемый параметром contamination=0.1

- WebSocket: обеспечивает передачу данных

2. Архитектура системы

Архитектура системы включает четыре ключевых компонента:

- Агенты (Go) — осуществляют сбор метрик через SSH с частотой 1 раз в секунду [3];
- Серверная часть (FastAPI) — реализует REST-интерфейс и обработку поступающих данных;
- Веб-интерфейс (Vue.js) — обеспечивает визуализацию данных в виде адаптивных дашбордов, построенных с использованием библиотеки Chart.js;
- MongoDB — выполняет хранение временных рядов объёмом до 1 миллиона записей с временем выборки не более 200 мс [4].

3. Алгоритм прогнозирования аномалий

Система реализует следующий алгоритм:

1. **Сбор данных:** агенты записывают метрики в базу данных MongoDB с привязкой ко времени [4]
2. **Обнаружение и анализ аномалий**: каждые 5 секунд модель Isolation Forest обрабатывает данные за предыдущие 7 суток, выполняет их нормализацию и классифицирует текущее значение (c).
3. **Уведомления**: при классификации значения как аномального (P (c, H) = -1) система формирует уведомление через Telegram.
4. **Прогнозирование пиков нагрузки:** при превышении средней загрузки CPU более 90 % на протяжении 3–4 дней (определяется на основе скользящего окна), система инициирует автоматическую рекомендацию на

увеличение серверных ресурсов. По результатам тестирования, точность прогнозирования достигает 92 %, при горизонте до 72 часов.

Выводы

В рамках проведённого исследования разработана автономная система мониторинга и прогнозирования нагрузок серверной инфраструктуры — Server Pulse, ориентированная на использование в условиях ограниченного доступа к облачным решениям. Предложенная система устраняет ряд ограничений, характерных для традиционных инструментов, и обеспечивает:

- сбор и хранение метрик в реальном времени;
- автоматическое выявление аномалий с точностью до 92 %;
- минимальную задержку обработки (менее 1 секунды);
- прогнозирование пиковых нагрузок процессора (более 90 %) с горизонтом 72 часа.

Результаты тестирования демонстрируют, что использование системы позволяет сократить время реакции на критические инциденты до 40 % и повысить эффективность планирования закупок за счёт упреждающего анализа. Дальнейшее развитие предполагает интеграцию с корпоративными ERP-системами с целью автоматизации тендерных процедур, а также разработку мобильного клиентского интерфейса для оперативного контроля состояния инфраструктуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козловский А. А. Мониторинг И Администрирование Серверов. — М.: Дмк Пресс, 2020.
2. Scikit-Learn Documentation. Isolation Forest. — Url: Https://Scikit-Learn.Org/Stable (Дата Обращения: 01.06.2025).
3. Донован А., Керниган Б. Язык Программирования Go. — М.: Вильямс, 2019.
4. Бэнкс Э., Портер Р. Mongodb В Действии. — М.: Дмк Пресс, 2021.
5. Фримен Э., Робсон Э. Изучаем Vue.Js. — М.: Питер, 2022.
6. Рамальо Т. Fastapi: Современная Разработка Веб-Api На Python. — М.: Дмк Пресс, 2023.
7. Лю Г. Isolation Forest: Теория И Практика Обнаружения Аномалий. — Спб.: Бхв-Петербург, 2024.
8. Гаррет Дж. Элементы Опыта Взаимодействия Пользователя: Основы Проектирования Интерфейсов. — М.: Манн, Иванов И Фербер, 2021.
9. Нильсен Я. Ui/Ux-Дизайн: Практическое Руководство. — М.: Эксмо, 2023.
10. Itic. 2024 Server Downtime Cost Report. — Url: Https://Www.Iticcorp.Com (Дата Обращения: 01.06.2025).

Авторы: Маткалыков Медер Нооманжанович, студент гр. ИТУ(б)-1-21, Кыргызский Государственный Технический Университет им. И. Раззакова, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова. 66, 720044, телефон: +996 (312)545173, email: matkalykov.m@icloud.com

Иманакунова Нуржан Тилековна, аспирант кафедры «Автоматическое Управление», Кыргызский Государственный Технический Университет им. И. Раззакова, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова. 66, 720044, телефон: +996 (312)545173, email: imanakunova.nurzhan@kstu.kg

Кадыркулова Кыял Кудайбердиевна, к.т.н. доцент, кафедра «Автоматическое Управление», Кыргызский Государственный Технический Университет им. И. Раззакова, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова. 66, 720044, телефон: +996 (312)545173, email: kyiala@kstu.kg

Authors: Matkalykov Mederbek Noomanzhanovich., student group ITU(b)-1-21, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Kyrgyz Republic, Bishkek, 66 Ch. Aitmatov Ave., 720044, phone: +996(312)545173, email: matkalykov.m@icloud.com

Imanakunova Nurzhan Tilekovna, postgraduate student at the Department of Automatic Control, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Kyrgyz Republic, Bishkek, 66 Ch. Aitmatov Ave., 720044, phone: +996 (312)545173, email: imanakunova.nurzhan@kstu.kg

Kadyrkulova Kyial Kudayberdievna, PhD, Associate Professor at the Department of Automatic Control, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Kyrgyz Republic, Bishkek, 66 Ch. Aitmatov Ave., 720044, phone: +996 (312)545173, email: kyiala@kstu.kg

УДК 004.045

Криницин Павел Геннадьевич

СИСТЕМА АДАПТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПЕЧИ ПРОКАЛИВАНИЯ НЕФТЯНОГО КОКСА

В статье представлено исследование по разработке и внедрению адаптивной системы управления положением вращающейся печи прокаливания нефтяного кокса. Печь выполнена в виде изнутри футерованного стального барабана длиной 45 метров и диаметром 3 метра, вращающегося в процессе эксплуатации на роликовых опорах. Целью работы является исследование интегрированной автоматизированной системы управления, способной в реальном времени контролировать и корректировать положение барабана в горизонтальной плоскости на основе анализа сигналов, поступающих от датчиков положения бандажей барабана печи. Ключевыми задачами данного исследования являются выявление и глубокий анализ факторов, нарушающих стабильность процесса перемещения печи, комплексное изучение ограничений традиционных схем управления, а также обоснование и демонстрация преимуществ внедрения автоматизированного подхода, существенно снижающего износ опорных элементов и повышающего общую эффективность технологического процесса. Полученные результаты свидетельствуют о повышении эффективности процесса перемещения прокалочной печи, увеличении ресурса опорных роликов и бандажей, а также снижении вероятности возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: прокалочная печь, адаптивное управление, автоматизация производства, нефтяной кокс.

Krinitsin Pavel Gennadievich

ADAPTIVE POSITION CONTROL SYSTEM FOR A PETROLEUM COKE CALCINATION KILN

In this article, a study is presented on the development and implementation of an adaptive control system for the positioning of a rotary kiln for petroleum coke calcination. The kiln is designed as a 45-meter-long, 3-meter-diameter steel drum with an internal refractory lining, rotating during operation on roller supports. The main goal of the research is to investigate an integrated automated control system capable of monitoring and adjusting the horizontal position of the drum in real time based on the analysis of signals received from the drum's tyre position sensors. The key objectives of this study include identifying and thoroughly analyzing factors that disrupt the stability of the kiln's movement process, conducting a comprehensive study of the limitations of traditional control schemes, as well as substantiating and demonstrating the advantages of implementing an automated approach that significantly reduces the wear of support components and enhances the overall efficiency of the technological process. The obtained results indicate an improvement

in the efficiency of the kiln movement process, an increase in the service life of support rollers and tyres, and a reduction in the likelihood of emergency situations.

Keywords: calcining kiln, adaptive control, industrial automation, petroleum coke.

Введение

Получение высококачественного кокса для производства электродов имеет важное значение для алюминиевой промышленности. Прокалка является основной технологической стадией, на которой формируются однородность состава и структурные особенности конкретного кокса [1,2]. В современных производствах прокаливания нефтяного кокса ключевым технологическим оборудованием является вращающаяся печь. Динамические нагрузки при ее перемещении воспринимаются опорными роликами и бандажами обечаек корпуса [3], рисунок 1. Стабильность работы этих узлов определяет надежность оборудования. Нарушение смещения положения барабана приводит к неравномерному износу деталей, внеплановым простоям, недовыпуску продукции и браку.

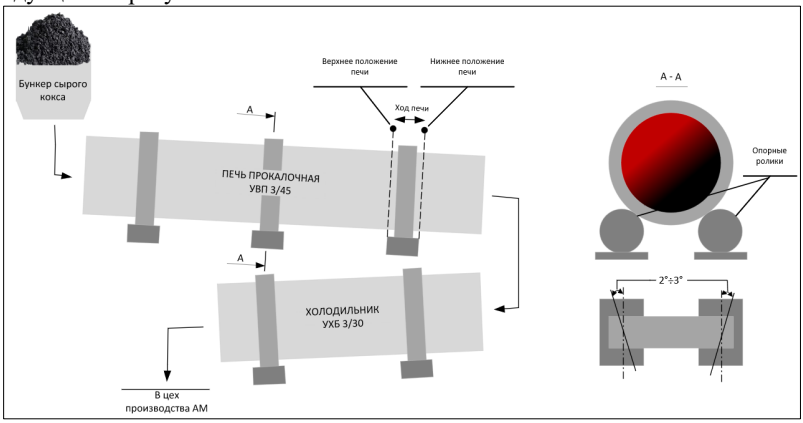


Рис.1 Схема работы оборудования прокалочного комплекса и объект управления

Традиционные системы управления вращающейся печью основаны на ручном контроле положения барабана с оценкой субъективных признаков, что затрудняет точное и своевременное реагирование на возникающие динамические отклонения. Ошибки эксплуатации, из-за влияния человеческого фактора, приводят к нарушениям режима перемещения печи и росту затрат на ремонт изнашиваемого оборудования. Актуальной задачей становится разработка и внедрение автоматизированных систем управления [4], способных в режиме реального времени отслеживать состояние печи и корректировать её положение на основе объективных технологических параметров. Особый интерес представляют адаптивные системы, использующие данные от

бесконтактных датчиков положения и реализующие современные алгоритмы управления для регламентированного перемещения барабана печи в горизонтальной плоскости. Такой подход позволяет существенно повысить надёжность и долговечность оборудования, минимизировать человеческий фактор и оптимизировать производственный процесс.

Основная часть

Традиционное управление перемещением печи осуществляется следующим образом — оператор, ориентируясь на показания датчиков положения, вручную наносит консистентную смазку на вращающиеся элементы. Объём и места нанесения смазки определяются персоналом эмпирически. Общий алгоритм перемещения барабана прокалочной печи включает следующие этапы:

– определяется текущее положение прокалочной печи по среднему банадажу и его взаиморасположение относительно датчика;

– фиксируется и отображается на экране оператора процесса прокаливания текущее положение печи;

– в зависимости от положения прокалочной печи: верхнее или нижнее, а также с учетом длительности нахождения печи в крайних положениях реализуются соответствующие алгоритмы управления.

Автоматизированное управление процессом перемещения барабана прокалочной печи

Автоматизированная система управления прокалочной печью осуществляет непрерывный контроль положения бандажей и дозированное нанесение смазочного материала на ролики и бандажи в заданные интервалы времени. При отклонениях от графика перемещения барабана система автоматически выполняет дополнительную смазку для корректировки работы вращающихся механизмов.

Реализованная по такому принципу система управления обладает свойствами адаптивности [5,6], позволяя реагировать на изменения в технологическом процессе прокаливания кокса, связанном с изменением температур и объемом перерабатываемого сырья. Процесс автоматизированного управления процессом перемещения печи не требует участия технологического персонала. Контроль оператора необходим только для определения исправности оборудования самой системы перемещения, рисунок 2.

Система автоматизированного управления положением прокалочной печи состоит из следующих элементов:

– блок контроля за положением печи;

– алгоритм принятия решений, задающий регулирующее воздействие на печь с целью изменения ее положения, предусматривающий настройку технических параметров управления (объем смазочных материалов, место их нанесения, дальнейший контроль за изменением положения печи и т.д.) [7];

–насосное оборудование и трубопроводы подачи смазки к роликам и бандажам;

–визуализация работы системы на рабочем месте технологического персонала.



Рис.2 Сравнительные характеристики процесса перемещения прокалочной печи в традиционной и автоматизированной схеме работы

Выводы

Эффективность работы системы автоматизированного управления подтверждается результатами экспериментов, свидетельствующих о снижении числа ошибок процесса регулирования, таких как превышение времени нахождения печи в верхнем положении и самопроизвольное прекращения опускания печи, таблица 1.

Система регулирования положения прокалочной печи интегрируется в комплекс параметрической диагностики оборудования [8], позволяя повысить общую эффективность процесса прокаливания нефтяного кокса за счет сокращения числа внеплановых отказов и увеличения ходимости основных узлов печи.

Таблица 1

Сравнительный анализ эффективности работы двух систем управления: традиционной и автоматизированной схемы

Ошибки процесса	Схемы управления	
	Традиционная схема	Автоматизированная схема
Превышение времени нахождения печи в верхнем положении	45%	7%
Самопроизвольное прекращение опускания печи	14%	1%

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sharikov, F. Y. Selection of key parameters for green coke calcination in a tubular rotary kiln to produce anode petcoke / F. Y. Sharikov, Y. V. Sharikov, K. A. Krylov // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2020. – Vol. 15, No. 23. – P. 2904-2912.

2. Mungyeko Bisulandu, B. J. R. Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications / B. J. R. Mungyeko Bisulandu, F. Huchet // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 221. – P. 119637.

3. Исследование возможных изменений жесткости бандажа в результате мобильной технологии обработки поверхности качения / И. В. Шрубченко, А. В. Хуртасенко, Т. А. Дуюн, М. Н. Воронкова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2022. – № 2. – С. 102-113.

4. Improving the efficiency of greasing operations with the lubrication management support system - a case study / M. Piechowski, R. Wyczółkowski, W. Paszkowski, A. Meller // IFAC-PapersOnLine. – 2024. – Vol. 58, No. 8. – P. 228-233.

5. Осадченко, Т. Н. Комплексные адаптивные системы: основные понятия и свойства / Т. Н. Осадченко // Инновационная наука. – 2016. – № 1-1. – С. 149-151.

6. Resilient Design and Operation of Cyber Physical Systems with Emphasis on Unmanned Autonomous Systems / G. Vachtsevanos, B. Lee, S. Oh, M. Balchanos // Journal of Intelligent and Robotic Systems. – 2018. – Vol. 91, No. 1. – P. 59-83.

7. Цветков, В. В. Об алгоритмах и моделях, данных в решении задач принятия решения / В. В. Цветков, В. И. Сумин // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. – 2010. – № 13(84). – С. 132-142.

8. Белкин, А. П. Диагностика теплоэнергетического оборудования / А. П. Белкин, О. А. Степанов. – 2-е, Стереотипное. – Санкт-Петербург : Издательство Лань, 2017. – 240 с.

Автор: Криницин Павел Геннадьевич, аспирант Сибирского федерального университета, Россия, город Красноярск, улица Академика Киренского, 26, корп. 1, 660074, телефон: +7 (950) 122-84-27, email: alfa_reklama@mail.ru.

Author: Krinitsin Pavel Gennadievich, postgraduate student of Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, Akademika Kirenskogo Street, 26, building 1, 660074, phone: +7 (950) 122-84-27, email: alfa_reklama@mail.ru.

УДК 004.056

Трофимычев Илья Игоревич

КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ КОМПРОМЕТАЦИИ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ

Развитие области информационной безопасности за последнее десятилетие достигло значительных успехов: существует тенденция к объединению отдельных продуктов в единые экосистемы, что обеспечивает сквозную защиту данных за счет интеграции технологий, автоматизации процессов и централизованного управления рисками. Более того, интеграция различных источников информации в единую сеть позволяет использовать методы управления знаниями для создания интеллектуальных модулей, способных решать ранее не проработанные задачи. Данная работа посвящена разработке концепции интеллектуальной системы для оценки вероятности компрометации корпоративной сети. Предложенная решение включает в себя несколько уровней: уровень онтологии кибербезопасности, уровень структуры корпоративной сети, уровень информации, поступающей со средств защиты информации и уровень графа знаний. Такой подход может стать эффективным способом решения таких задач как детектирование атак с обфускацией, комбинированных атак и идентификация злоумышленника по его атаке на сеть.

Инцидент информационной безопасности, мониторинг, граф знаний, интеллектуальная система, управление инцидентами, оценка уязвимостей.

Trofimychev Ilya Igorevich

THE CONCEPT OF AN INTELLIGENT SYSTEM FOR ASSESSING THE PROBABILITY OF A CORPORATE NETWORK COMPROMISING

The development of information security over the past decade has achieved significant success: there is a tendency to combine individual products into single ecosystems, which ensures end-to-end data protection through technology integration, process automation, and centralized risk management. Moreover, the integration of various information sources into a single network makes it possible to use knowledge management methods to create intelligent modules capable of solving previously undeveloped tasks. This work is devoted to the development of the concept of an intelligent system for assessing the likelihood of compromise of the corporate network. The proposed solution includes several levels: the level of the cybersecurity ontology, the level of the corporate network structure, the level of information coming from information security tools and the level of the knowledge graph. This approach can be an effective way to solve problems such as detecting attacks with obfuscation, combined attacks, and identifying an attacker by attacking the network.

Information security incident, monitoring, knowledge graph, intelligent system, event management, vulnerability assessment.

Введение

В условиях стремительной цифровизации и усложнения киберугроз обеспечение информационной безопасности превратилось в критически важный элемент функционирования современных организаций. За последнее десятилетие данная область претерпела существенные изменения: от разрозненных решений, направленных на устранение отдельных уязвимостей, к формированию целостных экосистем, обеспечивающих непрерывную защиту на всех этапах взаимодействия с цифровыми активами. Этот переход стал возможным благодаря интеграции разнородных источников данных, автоматизации процессов мониторинга и реагирования на угрозы, а также внедрению передовых методов анализа данных. В настоящее время современные системы успешно справляются с основными задачами мониторинга и реагирования, однако некоторые техники злоумышленников все еще представляют серьезные вызовы, такие как:

– Атаки с обфускацией (также называемые полиморфными или метаморфными атаками) – кибератаки, в которых вредоносные действия маскируются под легитимные запросы для избежания обнаружения;

– Комбинированные атаки, включающие в себя сразу несколько техник или производящие атаки с нескольких направлений;

– Поиск корреляций между произведенными атаки, тактиками и APT-группировками [1-4].

Представленная работа предлагает концепцию интеллектуальной системы, способной оценивать вероятность компрометации корпоративной сети при помощи многоуровневого анализа данных даже в случае комбинированной или полиморфной атаки. Основу решения составляют три взаимосвязанных компонента, двигаясь от общего к частным компонентам: онтология кибербезопасности, модель корпоративной сети и поток данных от средств защиты информации. Все эти компоненты объединяются в единое семантическое пространство на основе графа знаний. Подобная архитектура не только обеспечивает глубокий контекстный анализ угроз, но и позволяет выявлять скрытые взаимосвязи между событиями, что особенно актуально для противодействия сложным атакам.

Основная часть

Описываемая концепция представляет из себя ИСЗИ, функционирующее в системе совместно с уже подключенными SIEM и Threat Intelligence системами [5]. Для корректного выполнения задачи ИСЗИ использует три уровня знаний: фундаментальные знания, статическая информация о системе и динамическая информация в системе (см. рис. 1). Первый уровень представлен онтологией кибербезопасности, содержащей ключевые понятия о защищаемых активах, рисках, угрозах, уязвимостях, видах атак и т.д. Он предоставляет базовые знания и предназначен для того, чтобы ИСЗИ могла классифицировать объекты и процессы, а также контекстуализировать получаемые данные в рамках предметной области. Основой для данного источника информации может

служить уже существующая Threat Intelligence система, либо в случае ее отсутствия – подключаемый модуль самой ИСЗИ. Далее следует статический уровень – это информация, получаемая от SIEM системы и считающаяся достаточно постоянной на время работы системы (исключая периоды обновлений). Она включает в себя структуру защищаемой корпоративной сети (количество и виды устройств, установленное на них программное обеспечение, а также непосредственно их связи друг с другом), список сотрудников, их права доступа, а также их физический доступ к устройствам. Эта информация нужна для того, чтобы определить зоны риска для конкретной инфраструктуры, контекстуализировать информацию на уровне топологии сети, а также для выявления потенциальных путей полиморфной атаки и/или атаки с комбинированным направлением. Последний слой знаний представляет из себя нормализированный поток инцидентов, поступающий от SIEM системы, который будет анализироваться ИСЗИ для сравнения с известными паттернами атак и идентификации действий злоумышленников.



Рис. 1 Схема распределения элементов системы по уровням абстракции

Для реализации данной концепции используется математическая модель графов знаний, поскольку она позволяет связать на семантическом уровне перечисленные выше уровни знаний, а также реализовать возможность выполнять к полученной системе запросы. Инфраструктура компании структурно представляется в виде графа, где узлы соответствуют защищаемым активам, а рёбра отражают их функциональные и информационные взаимосвязи. Данная информация обогащается при помощи знаний, представленных в онтологии кибербезопасности. Затем при возникновении инцидентов ИСЗИ сопоставляет их с известными паттернами атак, анализирует возможность реализации в текущей конфигурации (наличие эксплуатируемых уязвимостей, маршруты эскалации привилегий) и вычисляет вероятность компрометации системы, при необходимости дополняя оценку атрибуцией к APT-группам на основе индикаторов компрометации (IoC).

Полноценная разработка данной ИСЗИ является крайне трудоемким процессом, поэтому в зависимости от ресурсов и целей можно выбрать следующие варианты реализации:

– Интеграция с уже известными технологическими решениями. Данный вариант предполагает активное сотрудничество с передовыми отечественными компаниями в области информационной безопасности, такими как: Kaspersky, Positive Technologies и Ростелеком-Солар;

- Плюсы: интеграция с ведущими вендорами предполагает использование наиболее передовых технологий, доступ к свежим и реальным данным, а также возможную консультацию со стороны компетентных специалистов;
- Ограничения: сотрудничество с коммерческими структурами наложит ограничения на модель распространения данной ИСЗИ и вероятно не позволит реализовывать универсальное решение вне экосистемы вендора;

– Использование открытых и полуоткрытых источников, таких как CyGraph, MITRE D3FEND, TAGraph, UCO, STUCCO и др.[6-10];

- Плюсы: использование частично готовых решений позволяет снизить нагрузку на разработку, а также не накладывает существенных ограничений на интеллектуальную собственность;
- Ограничения: сотрудничество с коммерческими структурами наложит ограничения на модель распространения данной ИСЗИ и вероятно не позволит реализовать универсальное решение вне экосистемы вендора;

– Самостоятельная разработка всех элементов ИСЗИ;

- Плюсы: возможность разработать наиболее гибкий и универсальный инструмент, отвечающий всем требованиям;
- Ограничения: огромный объем работы, необходимость ручного заполнения онтологии.

Выводы

В данной работе описана концепция и структура интеллектуальной системы защиты информации, способной потенциально расширить функционал современных SIEM систем за счет использования технологий управления знаниями. Объединяя данные из различных источников в единое семантическое пространство, ИСЗИ демонстрирует потенциал в решении таких задач, как:

– Идентификация полиморфных кибератак с обфускацией вектора атаки;

– Идентификация кибератак комбинированного направления;

– Сопоставление кибератаки и потенциально ответственного злоумышленника;

Следующим этапом в направлении данной работы является определение технических требований к каждому компоненту системы, разработка детальной

математической модели, а также подбор открытых решений для интеграции/ разработка недостающих компонентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. URL: https://securitymedia.org/info/evolyutsiya-programm-vymogateley-v-2025-godu-novye-tekhniki-skhemy-monetizatsii-i-ugrozy.html (дата обращения 19.05.2025 г.).

2. URL: https://namib.online/2025/01/obzor-vazhnyh-materialov-po-ib-27-01-2025/ (дата обращения 19.05.2025 г.).

3. URL: https://www.itsec.ru/news/analitika-red-security-soc-v-pervom-kvartale-2025-goda-kolichestvo-atak-na-finansoviy-sektor-viroslo-bolee-chem-v-dva-raza (дата обращения 19.05.2025 г.).

4. URL: https://www.itsec.ru/news/analitika-red-security-soc-v-pervom-kvartale-2025-goda-kolichestvo-atak-na-finansoviy-sektor-viroslo-bolee-chem-v-dva-raza (дата обращения 19.05.2025 г.).

5. Котенко, И. В., & Саенко, И. Б. (2012). Построение системы интеллектуальных сервисов для защиты информации в условиях кибернетического противоборства. Труды СПИИРАН, 3(22), 84-100. https://doi.org/10.15622/sp.22.5

6. Noel S, Bodeau D, McQuaid R (2017) Big data graph knowledge bases for cyber resilience. In: Kott A, Rodosek GD (eds) NATO IST-153/RWS-21Workshop on Cyber Resilience. RWTH Aachen, Aachen, pp 6–21. https://ceur-ws.org/Vol-2040/paper2.pdf

7. Kaloroumakis PE, Smith MJ (2021) Toward a knowledge graph of cybersecurity countermeasures. https://d3fend.mitre.org/resources/D3FEND.pdf

8. Hooi EKJ, Zainal A, Maarof MA et al (2019) TAGraph: knowledge graph of threat actor. In: 2019 International Conference on Cybersecurity (ICoCSec). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICoCSec47621.2019.8970979

9. Syed Z, Padia A, Finin T et al (2016) UCO: a Unified Cybersecurity Ontology. In: AAAI Workshop on Artificial Intelligence for Cyber Security. AAAI

10. Iannacone M, Bohn S, Nakamura G et al (2015) Developing an ontology for cyber security knowledge graphs. In: Trien JP, Prowell SJ, Bridges RA et al (eds) Proceedings of the 10th Annual Cyber and Information Security Research Conference. ACM, New York. https://doi.org/10.1145/2746266.2746278

Автор: Трофимычев Илья Игоревич**,** преподаватель кафедры электронных систем и информационной безопасности (ЭСИБ) Самарского государственного технического университета (СамГТУ) . 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Тел. +7 917 959-51-20. E-mail: mr.trofimychev@mail.ru

Author: Trofimychev Ilya Igorevich**,** Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation; Lecturer in Electronic Systems and Information Security Department. Tel. +7 917 959-51-20. E-mail: mr.trofimychev@mail.ru

УДК 621-396

Горобцов Александр Сергеевич, Данилевич Владислав Максимович, Зубко Михаил Вадимович, Щербов Роман Михайлович, Климов Константин Владимирович, Сафонова Наталья Константиновна

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМОГО ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА С УПРУГИМИ ЗВЕНЬЯМИ В ОБОЛОЧКЕ FRUND

Аннотация: Представлен процесс моделирования управляемого движения манипулятора, оснащённого УПРУГИМИ звеньями. Для сравнительного анализа рассчитываются программные и управляемые движения в программном комплексе FRUND. Решается обратная задача кинематики. Анализируется устойчивость управляемого движения рабочего органа манипулятора.

Ключевые слова: моделирование, манипулятор, FRUND, жёсткие звенья, упругие звенья, обратная задача, точность перемещения, устойчивость движения.

Gorobtsov Alexander Sergeevich, Danilevich Vladislav Maksimovich, Zubko Mikhail Vadimovich, Shcherbov Roman Mikhailovich, Klimov Konstantin Vladimirovich, Safonova Natalia Konstantinovna

SIMULATION OF CONTROLLED MOTION OF A MANIPULATOR WITH ELASTIC LINKS IN A FRUND SHELL

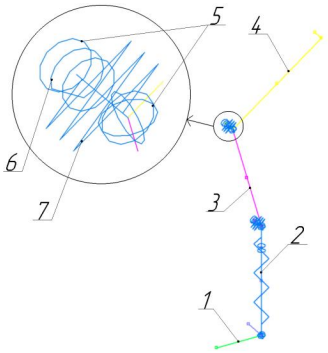
Abstract: The process of modeling the controlled motion of a manipulator equipped with ELASTIC links is presented. For comparative analysis, program and controlled motions are calculated in the FRUND software package. The inverse kinematics problem is solved. The stability of the controlled motion of the manipulator's working element is analyzed.

Keywords: modeling, manipulator, FRUND, rigid links, elastic links, inverse problem, movement accuracy, motion stability.

Введение

Одной из разновидностей роботов являются коллаборативные роботы – коботы. Коботы – это автоматические механизмы способные работать на производстве различных продуктов совместно с человеком, что в свою очередь позволяет не останавливать производство в случае необходимости физического взаимодействия с людьми [1]. Данные роботы в отличии от стандартных промышленных машин способны отслеживать положение работника в их рабочей зоне и не допускать аварийных ситуаций с помощью датчиков. Коботы, как и промышленные роботы оснащены манипуляторами и программируемыми устройствами управления, однако значительно меньше, компактнее и дешевле своего конкурента [2]. Коллаборативные роботы применяются на производстве в решении задач, которые нельзя полностью автоматизировать [3]. Не смотря на то, что коботы намного безопаснее, методы управления такими роботами сложнее, и не всегда эффективны. В связи с этим, актуальным является синтез законов их управления.

Основная часть



1 – Основание; 2 – Первое звено; 3 – Второе звено; 4 – Третье звено; 5 – Цилиндрический шарнир; 6 – Соединительный элемент, задающий программную силу; 7 – Соединительный элемент, моделирующий ПД регулятор

Рис. 1 Модель манипулятора с жёсткими звеньями

Манипулятор, показанный на рисунке 1, состоит из трёх звеньев и основания. Каждое звено имеет 6 степеней свободы, а в сумме $6 * 3 = 18$. Кинематические связи убирают 15 степеней свободы, следовательно, манипулятор имеет 3 степени свободы и три привода. Все три звена имеют длину равную 500 мм. Для соединения основания с первым звеном, используется цилиндрический шарнир, состоящий из двух кинематических пар. Первая кинематическая пара является сферическим шарниром, а вторая – шарниром с двумя связями по осям XY. Так же между основанием и первым звеном присутствуют два соединительных элемента.

В соединении первого звена со вторым используется идентичный цилиндрический шарнир, состоящий из двух кинематических пар. Первая кинематическая пара является сферическим шарниром, а вторая – шарниром с двумя связями по осям XZ. Соединительные элементы между первым и вторым звеном работают в направлении UY.

Шарнир между вторым и третьим звеном полностью совпадает с шарниром между первым и вторым звеньями.

Для реализации моделирования управляемого движения с учётом упругих звеньев третье звено модели манипулятора было разбито на две части. Полученный в результате разделения упругий шарнир имел механические характеристики UX, UY, UZ. В итоге была полученная модель манипулятора, показанная на рисунке 2.

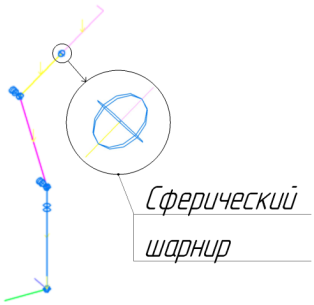


Рис. 2 Модель манипулятора с упругим шарниром

Был проведён расчёт параметров углового перемещения, скорости и управляющего момента в приводах манипулятора. На рисунке 3 показаны результаты, полученные во втором приводе.

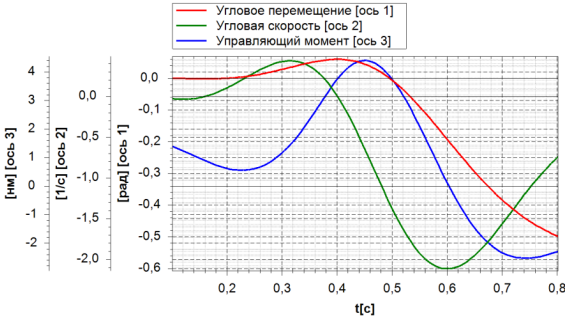


Рис. 3 Угловое перемещение, скорость и управляющий момент второго привода в случае упругого выходного звена

Следующим этапом стало снижение колебаний в приводах манипулятора, путём подбора оптимальных значений коэффициента жёсткости (csegm) и демпфирования (dsegm). На рисунке 4 показано влияние разных значений коэффициентов жёсткости на управляющий момент во втором приводе.

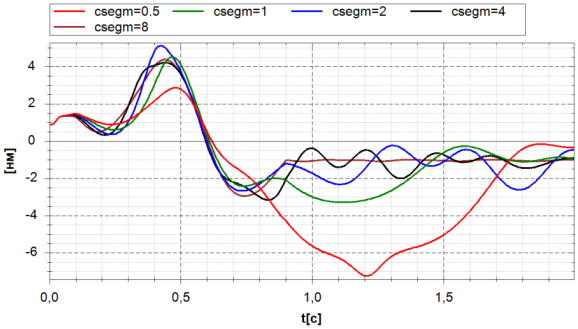


Рис. 4 – Зависимость управляющего момента второго привода от коэффициента жёсткости

На рисунке 5 показано влияние разных значений коэффициентов демпфирования на управляющий момент во втором приводе.

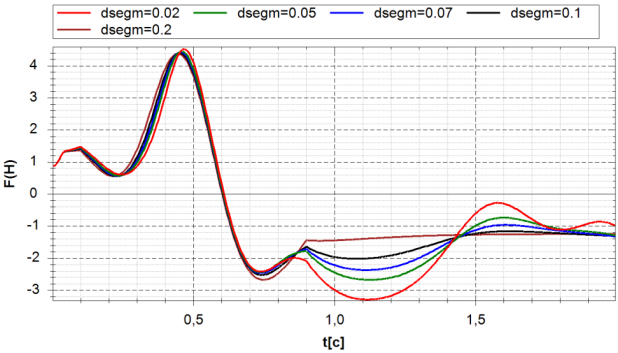


Рис. 5 Зависимость управляющего момента второго привода от коэффициента демпфирования

Результаты, показанные на рисунках 4 и 5 говорят о том, что увеличение значений коэффициентов жёсткости и демпфирования оказывает положительное влияние на управляющие моменты в приводах. Так же необходимо проверить влияние данных коэффициентов на точность перемещения точки схвата манипулятора. На рисунке 6 показана погрешность управляемого движения точки схвата манипулятора от программного в зависимости от коэффициента жёсткости.

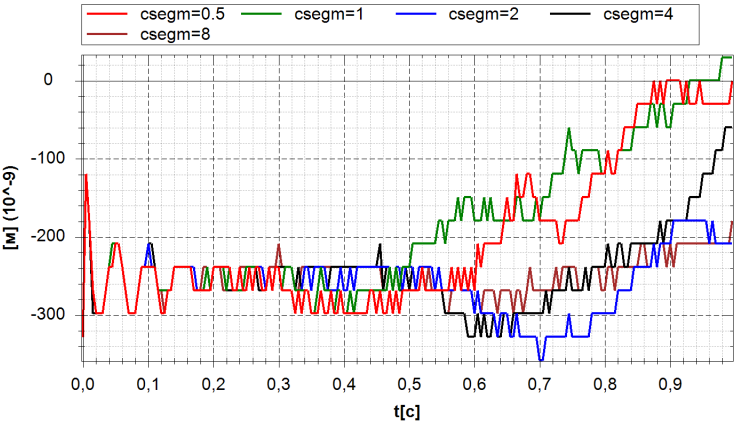


Рис. 6 Погрешность управляемого движения от программного в зависимости от коэффициента жёсткости по оси X

На рисунке 7 показана погрешность управляемого движения точки схвата манипулятора от программного в зависимости от коэффициента демпфирования.

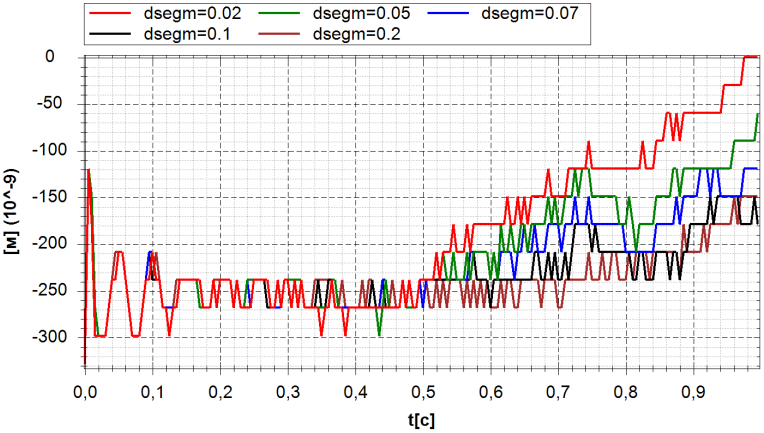


Рис. 7 Погрешность управляемого движения от программного в зависимости от коэффициента демпфирования по оси X

Результаты, показанные на рисунках 6 и 7, говорят о том, что коэффициенты жёсткости и демпфирования не существенно влияют на перемещение точки схвата манипулятора с погрешностью в 10^{-9}.

Выводы

Результаты, полученные в ходе эксперимента, показали, что использование упругих звеньев положительно влияет на управляемое движение манипулятора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mikkel S.K., Roy J.K. Collaborative Robots: Frontiers of Current Literature, ResearchGate. Available at: URL: https://www.researchgate.net/publication/342347381 (accessed 19 May 2024).

2. Спыну Г.А. Промышленные роботы. Конструирование и применение: Учеб. пособие. — 2-е изд., перераб. и доп.— К.: Выща шк., 1991. —311 с.

3. Picking with a robot colleague: A systematic literature review and evaluation of technology acceptance in human–robot collaborative warehouses, ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/publication/370206151 (accessed 19 May 2024).

4. Управление движением робота-собаки методом обратной задачи / А.С. Горобцов, Е.Н. Рыжов, Н.В. Чигиринская, О.К. Чесноков // Известия ВолгГТУ. Сер. Роботы, мехатроника и робототехнические системы. - Волгоград, 2024. - № 4 (287). - С. 49-54. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-4-287-49-54.

Автор: Горобцов Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры “Высшая математика” Волгоградского Государственного Технического Университета, Россия, город Волгоград, пр. им. Ленина 28, 400005, телефон +7 (8442) 24-84-87, email: vm@vstu.ru;

Данилевич Владислав Максимович, аспирант кафедры “Высшая математика” Волгоградского Государственного Технического Университета, Россия, город Волгоград, пр. им. Ленина 28, 400005, телефон +7 (9616) 73-26-01, email: vlad-danilevich.90@inbox.ru;

Зубко Михаил Вадимович, аспирант кафедры “Высшая математика” Волгоградского Государственного Технического Университета, Россия, город Волгоград, пр. им. Ленина 28, 400005, телефон +7 (9616) 73-26-01, email: vlad-danilevich.90@inbox.ru;

Щербов Роман Михайлович, ведущий инженер лаборатории робототехники НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация, Мичуринский проспект, дом 1, e-mail: romanscherbov@gmail.com;

Климов Константин Владимирович, ведущий инженер лаборатории робототехники НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация, Мичуринский проспект, дом 1, e-mail: kklimov@imec.msu.ru;

Сафонова Наталья Константиновна, ведущий инженер лаборатории робототехники НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация, Мичуринский проспект, дом 1, e-mail: safonova.nk@gmail.com

Author: Gorobtsov Aleksandr Sergeevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Higher Mathematics, Volgograd State Technical University, Russia, Volgograd, Lenin Ave. 28, 400005, phone +7 (8442) 24-84-87, email: vm@vstu.ru;

Danilevich Vladislav Maksimovich, Postgraduate Student, Department of Higher Mathematics, Volgograd State Technical University, Russia, Volgograd, Lenin Ave. 28, 400005, phone +7 (9616) 73-26-01, email: vlad-danilevich.90@inbox.ru;

Zubko Mikhail Vadimovich, Postgraduate Student, Department of Higher Mathematics, Volgograd State Technical University, Russia, Volgograd, Lenin Ave. Lenina 28, 400005, phone +7 (9616) 73-26-01, email: vlad-danilevich.90@inbox.ru;

Scherbov Roman Mikhailovich, lead engineer of robotics laboratory, Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, Michurinskiy prospect b. 1, e-mail: romanscherbov@gmail.com

KLIMOV Konstantin Vladimirovich, lead engineer of robotics laboratory, Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, Michurinskiy prospect b. 1, e-mail: kklimov@imec.msu.ru

SAFONOVA Natalia Konstantinovna, lead engineer of robotics laboratory, Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation, Michurinskiy prospect b. 1, e-mail: safonova.nk@gmail.com

УДК 631.3:004.8

Убейко Сергей Александрович, Колесова Кира Алексеевна,
Бабцов Семен Валентинович.

КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ТЕПЛИЧНАЯ СИСТЕМА (КАТС).

В статье представлена разработка комплексной автоматизированной тепличной системы (КАТС), включающей три ключевые подсистемы: автополив, автоматическое затемнение и автоматическую вентиляцию. Система ориентирована на снижение ресурс затрат, повышение урожайности и возможность выращивания различных культур с разными агротехническими требованиями в едином пространстве. Описана архитектура решений, включая использование датчиков IoT, микроконтроллеров и исполнительных механизмов.

Автополив, ресурсоэффективное сельское хозяйство, адаптивное освещение, PID-регуляция температуры, климат-контроль в теплицах.

Ubeyko Sergey Alexandrovich, Kolesova Kira Alekseyevna, Babtsov Semyon Valentinovich.

INTEGRATED AUTOMATED GREENHOUSE SYSTEM (IAGS).

This article presents the development of an integrated automated greenhouse system (IAGS), incorporating three main subsystems: automatic irrigation, automatic shading, and automatic ventilation. The system aims to reduce resource consumption, increase yield, and enable the cultivation of diverse crops with varying agricultural requirements within a single environment. The architecture includes IoT sensors, microcontrollers, and actuators.

Automatic irrigation, resource-efficient agriculture, adaptive lighting, PID temperature control, climate control in greenhouses.

Введение

Современное сельское хозяйство сталкивается с необходимостью повышения эффективности использования ресурсов в условиях роста населения и климатических изменений. Тепличные комплексы, как ключевой элемент продовольственной безопасности, требуют внедрения интеллектуальных систем, способных оптимизировать микроклимат без постоянного вмешательства человека. Разрабатываемая комплексная автоматизированная тепличная система (КАТС) объединяет три ключевые подсистемы: автополив, автозатемнение и автоматическую вентиляцию, что позволяет гибко адаптироваться к потребностям различных культур. Значимость проекта обусловлена необходимостью снижения ресурсозатрат. Например, по данным ООН, до 50% воды в сельском хозяйстве теряется из-за неэффективного орошения [6]. КАТС

решает эту проблему за счет зонального управления влажностью почвы. Успешные аналоги, такие как голландская система Ridder, уже демонстрируют снижение водопотребления на 30–40%, однако их стоимость ограничивает применение в малых хозяйствах [2]. КАТС, напротив, проектируется как модульная платформа с открытым ПО, что снижает стоимость внедрения на 35%. Особенность системы – возможность одновременного выращивания культур с разными требованиями. Например, в одной теплице можно разместить томаты, требующие умеренного полива и затемнения, и огурцы, нуждающиеся в высокой влажности и рассеянном свете. Это достигается за счет разделения на зоны с индивидуальными настройками. На рисунке 1 представлен концептуальный вид разрабатываемого комплекса, иллюстрирующий основные конструктивные особенности и дизайн-проект будущего сооружения.

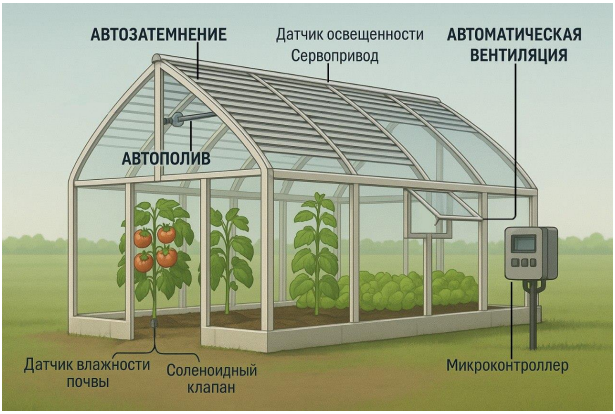


Рис. 1. Концептуальный вид КАТС

Основная часть

1. Система автоматического затемнения

Система автоматического затемнения реализована с применением жалюзи с электроприводом, управляемых датчиком освещённости BH1750 [1]. Принцип её работы основан на анализе текущего уровня освещённости и динамической регулировке угла наклона ламелей. Это позволяет поддерживать оптимальный световой режим внутри теплицы для различных культур. Жалюзи выполнены из поликарбонатных пластин толщиной 4 мм с УФ-фильтром, которые обеспечивают светопропускание на уровне 60% и защищают растения от избыточного ультрафиолетового излучения. Механизм основан на стержневом электродвигателе D8 Fce Mingardi [11], способном с точностью до одного градуса регулировать угол наклона ламелей, что обеспечивает плавность движения и минимизирует стресс у растений. Конструкция системы

предполагает использование анодированных алюминиевых направляющих и полимерных креплений [4], устойчивых к коррозии, перепадам температур и повышенной влажности. Управляющий модуль на базе микроконтроллера постоянно обрабатывает данные с датчика освещённости и регулирует степень затемнения в зависимости от пороговых значений, заданных индивидуально для каждой культуры. При высокой освещённости, превышающей 45 000 люкс, например, в полдень в южных регионах, жалюзи автоматически закрываются на 70%, снижая риск перегрева. Ночью они полностью открываются, способствуя естественному охлаждению воздуха.

Для культур, чувствительных к резким изменениям освещённости, в системе предусмотрена функция имитации рассвета и заката – угол наклона ламелей изменяется плавно в течение 30 минут. Это особенно актуально для листовых овощей, таких как салат, восприимчивых к световому стрессу. Настройка параметров работы системы осуществляется индивидуально под каждую культуру. В таблице 1 приведены примеры настройки системы автоматического затемнения для различных культур.

Таблица 1

Настройки системы автоматического затемнения для различных культур

Культура	**Порог освещённости, люкс**	**Степень затемнения, %**	**Особенности регулирования**
Салат	45 000	60	Плавное изменение угла наклона в течение 30 минут (имитация рассвета/заката)
Томаты	40 000	50	Защита от ожогов листьев
Огурцы	35 000	30	Предпочитают рассеянный свет

Эффективность предложенного решения была подтверждена в условиях промышленной теплицы «Зеленый Кузбасс» в городе Кемерово, где внедрение системы позволило повысить выживаемость саженцев хвойных пород деревьев [5].

2. Система автоматического полива

Автополив в КАТС основан на использовании емкостных датчиков влажности почвы Decagon Devices EC-5 [9], подключенных к микроконтроллеру Atmega328 [12]. Данное решение позволяет реализовать разделение на несколько зон полива. Каждая из них оснащается отдельным датчиком и соленоидным клапаном, что позволяет независимо управлять поливом. Например, в зоне для томатов полив активируется при снижении влажности до 40%, а для огурцов – при 60%. Гистерезис в ±3% предотвращает частые включения клапанов, увеличивая срок их службы. Учитывая выбранный микроконтроллер, система поддерживает до 8 зон, что позволяет выращивать в одной теплице культуры с

противоположными требованиями к влажности. Например, в зоне 1 можно разместить томаты с поливом длительностью 5 минут, в зоне 2 – огурцы с поливом 8 минут, а в зоне 3 – салат, требующий коротких циклов по 3 минуты.

Система непрерывно измеряет влажность почвы в каждой зоне теплицы с помощью емкостных датчиков Decagon Devices EC-5, которые передают данные на микроконтроллер Atmega328. Для каждой культуры задаются индивидуальные пороговые значения: например, полив томатов активируется при снижении влажности до 45%, огурцов – до 50%, а салата – до 55%. Как только показатель опускается ниже заданного минимума, микроконтроллер отправляет сигнал на соленоидный клапан соответствующей зоны, запуская подачу воды. Полив продолжается до достижения верхнего порога влажности (например, 75% для томатов, 80% для огурцов), после чего клапан автоматически закрывается. Предусмотрена возможность управления через мобильное приложение, где пользователь может корректировать параметры, запускать или останавливать полив в реальном времени, а также просматривать статистику по каждой зоне. Это позволяет гибко адаптировать систему под потребности разных культур, даже если они выращиваются в одной теплице [3], [7].

В тепличном комплексе «Зеленый дом» (Краснодарский край) такая конфигурация сократила расход воды с 5 до 3 м³/сутки на 100 м² [4]. Для обеспечения надежности система оснащена резервными источниками питания.

3. Система автоматической вентиляции

Система автоматической вентиляции в КАТС предназначена для поддержания стабильного микроклимата в теплице, обеспечивая оптимальный температурный режим для роста и развития растений. Основная цель – поддержание температуры в диапазоне от 22 °C до 26 °C, критичной для большинства распространённых культурных растений.

В системе установлено четыре датчика температуры DS18B20 [10], размещённые в стратегических точках теплицы: на уровне корневой зоны растений, на высоте около 1,5 м, возле входного и выходного отверстий теплицы. Эти датчики непрерывно регистрируют температуру окружающего воздуха и отправляют показания на центральный микроконтроллер. Механизм регулирования основан на алгоритме пропорционально-интегрального-дифференциального (PID) регулятора [8]. Пропорциональная составляющая регулирует угол открытия форточек прямо пропорционально величине отклонения температуры от установленной нормы, обеспечивая быструю реакцию на значительные изменения. Интегральная составляющая компенсирует накопившиеся статические погрешности, устраняя систематическое отклонение средней температуры от заданного диапазона. Дифференциальная составляющая: стабилизирует систему, предотвращая излишнюю реакцию на краткосрочные колебания температуры, учитывает скорость изменения температуры и препятствует сильному нагреванию или переохлаждению пространства теплицы.

Когда температура превышает установленный верхний предел на 1 °C, сервоприводы MG996R начинают постепенно открывать форточки, увеличивая приток свежего воздуха снаружи. Открытие форточек производится ступенчато: изначально форточки открываются на 10 %, а при дальнейшем росте температуры до 30 °C – полностью раскрываются.

Дополнительные вентиляторы осевого типа с регулируемой скоростью вращения установлены в верхней части теплицы и работают синхронно с открытием форточек, усиливая воздушный поток и ускоряя теплообмен. Осевые вентиляторы оснащены защитой от проникновения влаги и загрязнений, пригодны для эксплуатации в тяжёлых условиях с высокими температурами и влажностью.

Опыт практического применения подобной системы на примере тепличного комплекса «Теплицы Сибири» [5] подтвердил свою эффективность. Интеграция с системой автозатемнения способствует эффективному контролю теплового режима: закрытые жалюзи замедляют нагрев воздуха внутри теплицы, снижая потребность в активной вентиляции и продлевая срок службы вентиляционного оборудования [3].

Выводы

КАТС представляет собой практичное решение для автоматизации теплиц, сочетающее энергоэффективность, гибкость и доступность. Объединение автополива, автозатемнения и вентиляции в единый комплекс позволяет адаптировать систему под любые климатические условия и виды растений, это создаёт идеальные условия для успешного роста и плодоношения растений. Перспективы проекта включают интеграцию машинного обучения для прогнозирования погоды и внедрение беспроводных датчиков LoRaWAN [7], [8]. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию алгоритмов и снижение себестоимости компонентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Техническая документация датчика BH1750 // Mouser Electronics. – URL: https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf (дата обращения: 22.05.2025).

2. Системы автоматизации теплиц // Ridder. – URL: https://ridder.com/drive-systems/ (дата обращения: 03.03.2025).

3. Иванов А.А. IoT в сельском хозяйстве: автоматизация теплиц // Habr. – 2023. – URL: https://habr.com/ru/articles/739660/ (дата обращения: 22.05.2025).

4. Системы автоматизации теплиц // GreenhouseShop. – URL: https://greenhouseshop.ru/product-category/aksessuary/sistemy-avtomotizatsii-aksessuary/ (дата обращения: 22.05.2025).

5. Автоматизированный тепличный комплекс КузГТУ // Кузбасский государственный технический университет. – 2023. – URL:

https://kuzstu.ru/news/5538/avtomatizirovannyj-teplichnyj-kompleks-razrabotali-uchenye-kuzgtu/ (дата обращения: 22.05.2025).

6. Решения для сельского хозяйства // Hunter Irrigation. – URL: https://agriculture.hunterirrigation.com/ (дата обращения: 04.03.2025).

7. Kumar S. IoT-based Smart Greenhouse // ResearchGate. – 2017. – URL: https://www.researchgate.net/publication/316448621_IoT_based_smart_greenhouse (дата обращения: 22.05.2025).

8. Lopez-Cruz, I.L., et al. Greenhouse microclimate control: a review of sensors and control algorithms. – Biosystems Engineering, 2022.

9. Decagon Devices. EC-5 Soil Moisture Sensor User Manual. – Decagon Devices Inc., 2020.

10. DS18B20 Temperature Sensor Datasheet. – Maxim Integrated, 2019.

11. Mingardi. D8 FCE Electric Actuator Product Overview. – Mingardi S.r.l., 2020.

12. Atmel. ATmega328P Datasheet. – Microchip Technology Inc., 2020.

Автор: Бабцов Семен Валентинович, студент ИРТСУ Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Энгельса, д.1, 347900, телефон: +79185575609, email: semenvalentinovich@yandex.ru.

Автор: Убейко Сергей Александрович, студент ИРТСУ Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Энгельса, д.1, 347900, телефон: +79185224237, email: saubejko@mail.ru.

Автор: Колесова Кира Алексеевна, студент ИРТСУ Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Энгельса, д.1, 347900, телефон: +79061850431, email: kkolesova@sfedu.ru.

Author: Babtsov Semyon Valentinovich, Student, Institute of Radio Engineering Systems and Control, SFEDU, Russia, 347900, Taganrog, Engels Street, 1. Phone: +79185575609, email: semenvalentinovich@yandex.ru

Author: Ubeyko Sergey Aleksandrovich, Student, Institute of Radio Engineering Systems and Control, SFEDU, Russia, 347900, Taganrog, Engels Street, 1. Phone: +79185224237, email: saubejko@mail.ru

Author: Kolesova Kira Alekseyevna, Student, Institute of Radio Engineering Systems and Control, SFEDU, Russia, 347900, Taganrog, Engels Street, 1. Phone: +79061850431, email: kkolesova@sfedu.ru

УДК 658.51

Преображенский Андрей Петрович
Клименко Юрий Алексеевич
Фирсова Екатерина Александровна
Телегина Виктория Олеговна

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПРОИЗВОДСТВА НА ПРЕДПРИЯТИИ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННОГО МОДУЛЯ

В работе рассматриваются возможности управления процессами производства сложных технических объектов на предприятии на основе информационного модуля. С учетом ограничений по различным ресурсам происходит формирование оптимизационной модели. Вследствие неопределенности цели формирования сложных объектов, необходимо использовать трудность ее достижения. Используется интегральный подход, учитывающий множество показателей, с привлечением совокупности экспертов. Представлена последовательность совокупности экспертов для выбора наиболее лучшего решения в ходе производства.

Ключевые слова: Предприятие, управление, оптимизация, экспертный подход, информационный модуль.

Preobrazhenskiy Andrey Petrovich
Klimenko Yuriy Alexeevich
Firsova Ekaterina Alexandrovna
Telegina Viktoriya Olrgovna

THE CONTROL OF PRODUCTION PROCESSES AT THE ENTERPRISE BASED ON INFORMATION MODULE

The paper discusses the possibilities of managing the production processes of complex technical objects at the enterpriseon the base of information module. Taking into account the constraints on various resources, an optimization model is formed. Due to the uncertainty of the purpose of the formation of complex objects, it is necessary to use the difficulty of achieving it. An integral approach is used, taking into account a variety of indicators, with the involvement of a set of experts. A sequence of a set of experts is presented to select the best solution in the course of production information module.

Keywords: Enterprise, management, optimization, expert approach, information module.

Введение

В настоящее время на предприятиях используются информационные технологии. В данной работе даются предложения по информационному модулю, позволяющему повысить эффективность протекающих процессов на производстве.

Основная часть

При анализе производственных процессов внутри промышленной организации необходимо учитывать множество значимых факторов [1]. На предприятии создаются сложные технические объекты. Требуется осуществлять процессы управления по формированию таких объектов [2]. Предлагается опираться на информационный модуль. В нем применяется комбинированный подход, в который входят оптимизационные методы и учет мнений совокупности экспертов. Есть определенные ограничения по различным ресурсам [3]. Основываясь на них, можно создать оптимизационную модель:

$$\begin{aligned}&\sum_{j=1}^{n} r_j z_j x_j \to \max, \sum_{j=1}^{n} a_{ji} z_j x_j \le A_i, i = \overline{1,I},\\ &\sum_{j=1}^{n} q_{jf} z_j x_j \le Q_F, f = \overline{1,F}, \sum_{j=1}^{n} q_{jf} z_j x_j \le Q_F, f = \overline{1,F}\\ &x_j \ge x_j^{dop}, j = \overline{1,n}, z_j = \begin{cases}1,\\0,\end{cases} j = \overline{1,n},\end{aligned} \quad (1)$$

здесь - удельный ресурс, требующийся для операции j-го типа; x_j – число операций j-го типа z_j - булевая переменная, она равна 1, если j-й тип операции применяется в течение заданного времени, и будет 0, в противном случае, a_{ji}– коэффициент использования j-го материального ресурса для соответствующей операции; A_i– объемы готовящихся i-х материальных ресурсов; q_{ji} - коэффициент связи между производственным ресурсом f-го типа с операцией j-го типа; Q_f – объемы готовящихся производственных ресурсов f-го типа. В ходе формирования сложных технических объектов цель не всегда определенным образом обозначена. Кроме того, в ходе принятия решений не во всех случаях есть требуемая информация, которую будет обрабатывать информационный модуль [4]. То есть, требуется ориентироваться на некоторый интегральный показатель, позволяющий учесть различные варианты в ходе анализа производственных процессов. Чтобы осуществлять его оценку предлагается опираться на комбинированный подход, который может быть использован в ходе цифрового управления [5, 6]. При описании трудности достижения цели в производственном процессе предлагается использовать соответствующие определения [7]. Пусть рассматривается показатель j, который соотносится со шкалой (0,1). Его требуется оценить при помощи значения ^{0} , с учетом того, что эксперт в производственном процессе применяет значение, связанное с определенным порогом $^{0 \le}$ $_{j}$. Чтобы описать меру того, насколько решение будет иметь определенные вариации в рамках *j*-го показателя, необходимо ориентироваться на значение трудности, что будет требуемый уровень

$$d_j = \frac{\varepsilon_j\left(1-\mu_j\right)}{\mu_j\left(1-\varepsilon_j\right)}. \quad (2)$$

В ходе рассмотрения множества показателей $j = \overline{1,J}$, соответствующая трудность связана с интегральным эффектом. Это ведет к тому, что интегральный показатель будет таким

$$D = 1 - \prod_{j=1}^{J} (1 - d_1), \quad (3)$$

Процедура ранжирования производственных решений будет связана с ним. На основе информационного модуля можно учесть мнение совокупности экспертов. Они могут в ходе своей работы опираться на предварительным образом сформированную библиотеку решений, которые связаны с ключевыми особенностями производства сложных технических объектов [8, 9]. Предлагается в ходе работы совокупности экспертов ориентироваться на такие шаги. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

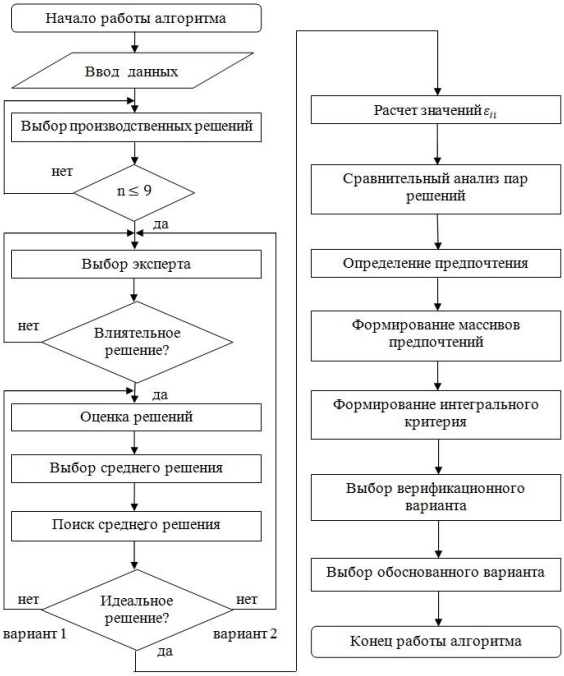


Рис.1 Блок-схема алгоритма

Шаг 1. При обращении к библиотеке каждый эксперт делает выбор некоторых производственных решений, которые могут быть нереализуемыми, а также ошибочными, Их число n≤9. Они с точки зрения того, чтобы производственный процесс был улучшен, должны быть согласованы с другими экспертами. Решения в дальнейшем при необходимости могут быть изменены.

Шаг 2. Делается выбор некоторого эксперта. Он должен провести анализ относительно сформированного подмножество среди тех решений, которые были выбраны. Перед тем, как он выдаст результаты, до него доводятся ключевые показатели [10]. Важно, чтобы было обеспечены процессы экспертного ранжирования как для полученных решений, так и по совокупности

анализируемых показателей. Для этого предусмотрено множество вопросов, которые будут предъявляться эксперту. Например, они могут быть такими: «С учетом какого из показателей будет делаться выбор необходимого решения?», «Какое из решений для вас рассматривается в виде предпочтительного?», «Что в таком решении вы можете выделить особенного?». Осуществляется выделение такого решения, которое является самым влиятельным.

Шаг 3. Эксперты участвуют в процессе оценки производственных решений $\mu_{ji}, \varepsilon_{ji}, i = \overline{1, I}$. При этом решения соответствующим образом нумеруются. Вся совокупность решений предлагается каждому из экспертов. Эта совокупность будет ими размещена внутри шкалы (0,1). После того, как все эксперты провели анализ, для их совокупности будет сформировано значение, которое будет средним $\mu_{ji}, i = \overline{1, I}$. Затем необходимо найти среднее значение ε_{ji}. Для этого всем экспертам из их совокупности формулируется вопрос: «Где в анализируемой шкале требуется поместить оценку производственного решения, рассматриваемого как «идеальное»».

Шаг 4. Осуществляется повтор по шагу 2 и шагу 3 пока не будут перебраны все эксперты в рассматриваемой совокупности. Поскольку предпочтения каждого из экспертов являются индивидуальными, то созданные решения будут достаточно разнообразными.

Тогда, с учетом действий всей совокупности экспертов можно осуществить расчет значений d_{ji}, которые соответствуют любому из решений. В итоге происходит расчет интегрального показателя D. Последние расчеты служат основой для обоснованного ранжирования решений. Подход, связанный с голосованием, дает возможности для того, чтобы результаты совокупности экспертов были верифицированы. Пусть производственные решения α и β связаны с парой некоторых показателей. Будем считать, что α характеризуется для второго показателя более высокой оценкой, а для β более высокая оценка будет по первому показателю. Эксперты, которые входят в рассматриваемую совокупность, должны определить выбор по решениям с привлечением метода голосования. Например, будет определено решение α с учетом принятия во внимание первого показателя. Затем процесс голосования повторяется, причем по α будет уменьшаться значение оценки. Голосование прекращается, когда совокупность экспертов придет к решению β. Далее будет рассматриваться пара «второй и третий показатель», «третий и четвертый показатель» с привлечением такого же процесса голосования. В итоге будет получено некоторое множество производственных решений. Оно может быть в дальнейшем упорядочено с точки зрения необходимости использования решений в определенной ситуации. По каждому из показателей может быть сопоставлено некоторое предпочтение α_j. Это дает возможности для того, чтобы по упорядоченному множеству решений дать характеристику его устойчивости. Учитывается условие нормировки

$$0 \le \alpha_j \le 1, \sum_{j=1}^{J} \alpha_j = 1. \qquad (4)$$

В ходе обработки значений предпочтений в информационной системе могут быть сформированы соответствующие массивы решений, являющимися упорядоченными. При этом внутри интервала происходит дискретизация с некоторым шагом, например, 0,01. Формирование интегрального критерия осуществляется с учетом коэффициентов α_j, при этом можно говорить об устойчивости результатов работы совокупности экспертов в том случае, если не будет изменения в ранжировании. Иначе необходимо, чтобы работа совокупности экспертов была реализована еще раз. Будет проведен выбор верификационного и обоснованного варианта, базирующегося на применении цифровых технологий.

Выводы

В работе даны предложения по информационному модулю для управления процессами на производстве. Показаны особенности оптимизационной модели. Для выбора решений представлены основные шаги экспертов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Садыков В.О., Сафин М.А. Анализ и моделирование производственных процессов для оптимизации систем управления // Аллея науки. 2024. Т. 1. № 5 (92). С. 30-33.

2.Турубарова К.А., Бородулина И.В. О характеристиках работы производственных предприятий // В сборнике: Проблемы развития современного общества. сборник научных статей 10-й Всероссийской национальной научно-практической конференции. Курск, 2025. С. 390-393.

3.Божкова А.Н., Нестеренко Е.Д., Альтварг М.С. Особенности управления ресурсами в промышленных компаниях // В сборнике: Экономические и социальные проблемы регионального развития в современных условиях. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. Курск, 2025. С. 96-98.

4.Валиев А.В.У., Хацкелева А.О., Львович Я.Е. О характеристиках структурного подхода при анализе компаний // В сборнике: Тренды развития современного общества: управленческие, правовые, экономические и социальные аспекты. Сборник научных статей 14-й Всероссийской научно-практической конференции. Курск, 2024. С. 104-106.

5.Львович К.И. Об использовании инновационных подходов в организации // В сборнике: Проблемы развития современного общества. Сборник научных статей 10-й Всероссийской национальной научно-практической конференции. В 4-х томах. Курск, 2025. С. 260-262.

6.Аветисян Т.В. Проблемы автоматизации на промышленном предприятии // В сборнике: Экономические и социальные проблемы регионального развития в современных условиях. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. Курск, 2025. С. 26-28.

7. Берколайко М.З., Долгих Ю.В., Иванова К.Г. Трудности в смысле И. Б. Руссмана и оценка надежности управления // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2008. № 2. С. 5-9.

8.Турубарова К.А., Плотников А.А. О характеристиках планирования работы организации // В сборнике: Экономические и социальные проблемы регионального развития в современных условиях. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции: в 2-х томах. Курск, 2025. С. 111-113.

9.Хакназаров И.В., Лямзин И.С., Львович Я.Е. О стратегическом управлении в организации // В сборнике: Молодежь и XXI век - 2025. Сборник научных статей 14-й Международной молодежной научной конференции. В 5-ти томах. Курск, 2025. С. 384-387.

10. Харченко Е.А. Морфологический подход к принятию обоснованных решений по экспертным суждениям // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика. 2019. № 2. С. 42-56.

Автор: Преображенский Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор Воронежского института высоких технологий, Россия, город Воронеж, улица Ленина73а, 394043, телефон: 2020420, email: app@vivt.ru.

Author: Preobrazhenskiy Andrey Petrovich, Doctor of Technical Sciences, professor, professor of Voronezh institute of high technologies, 394043, Russia, Voronezh,73aLenina street, phone: 2020420, email: email: app@vivt.ru.

Автор: Клименко Юрий Алексеевич, преподаватель Колледжа Воронежского института высоких технологий, Россия, город Воронеж, улица Ленина73а, 394043, телефон: 2020420, email: ****name@email.com.

Author: KlimenkoYuriyAlexeevich, lecturer of college of Voronezh institute of high technologies, 394043, Russia, Voronezh,73aLenina street, phone: 2020420, email: name@email.com.

Автор: Фирсова Екатерина Александровна**,** студент Воронежского института высоких технологий, Россия, город Воронеж, улица Ленина73а, 394043, телефон: 2020420, email: name@email.com.

Author: Firsova Ekaterina Alexandrovna, student of Voronezh institute of high technologies, 394043, Russia, Voronezh,73aLenina street, phone: 2020420, email: name@email.com.

Автор: Телегина Виктория Олеговна**,** студент Воронежского института высоких технологий, Россия, город Воронеж, улица Ленина73а, 394043, телефон: 2020420, email: name@email.com.

Author: Telegina Viktoriya Olegovna, student of Voronezh institute of high technologies, 394043, Russia, Voronezh,73aLenina street, phone: 2020420, email: name@email.com.

УДК 631.152:004.8:636.32/.38

Карпова Екатерина Дмитриевна, Суров Александр Иванович,
Фирсова Анна Максимовна

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ОВЦЕВОДСТВА: ПЕРСПЕКТИВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ

В представленной работе рассматривается актуальность и перспективы цифровизации овцеводства в условиях современной экономики. Главная цель состоит в установлении и обосновании потенциала и преимуществ цифровизации овцеводства для роста производительности и обеспечения стабильного прогресса отрасли. Задача заключается в обосновании перспектив дальнейшего развития и внедрения цифровых технологий в овцеводстве для повышения привлекательности и прибыльности отрасли. Подчеркивается, что внедрение цифровых технологий, таких как мониторинг здоровья животных с помощью датчиков, автоматизированные системы управления стадом и инновационные решения для организации труда чабанов (виртуальные ограждения, комфортабельные вагончики, скутеры и коптеры), позволяет оптимизировать процессы управления, повысить эффективность производства, улучшить условия труда и обеспечить устойчивое развитие отрасли. Рассмотрены преимущества новых подходов, включая повышение эффективности работы чабанов, оптимизацию использования пастбищ, улучшение благополучия животных и снижение затрат. Сделан вывод о том, что цифровизация открывает новые перспективы для повышения привлекательности и прибыльности овцеводства.

Цифровое овцеводство, овцеводство, сельское хозяйство, развитие животноводства.

Karpova Ekaterina Dmitrievna, Surov Alexander Ivanovich,
Firsova Anna Maksimovna

DIGITALIZATION OF SHEEP FARMING: PROSPECTS AND OPPORTUNITIES

The presented paper examines the relevance and prospects of digitalization of sheep farming in the modern economy. The main goal is to establish and substantiate the potential and benefits of digitalization of sheep farming to increase productivity and ensure the steady progress of the industry. The task is to substantiate the prospects for further development and implementation of digital technologies in sheep farming to increase the attractiveness and profitability of the industry. It is emphasized that the introduction of digital technologies, such as animal health monitoring using sensors, automated herd management systems and innovative solutions for organizing the work of shepherds (virtual fences, comfortable trailers, scooters and copters), allows optimizing management processes, increasing production efficiency, improving working conditions and ensuring the sustainable development of the industry. The

advantages of new approaches are considered, including increasing the efficiency of shepherds, optimizing the use of pastures, improving animal welfare and reducing costs. It is concluded that digitalization opens up new prospects for increasing the attractiveness and profitability of sheep farming.

Digital sheep farming, sheep farming, agriculture, livestock development.

Введение.

Внедрение цифровых технологий становится ключевым направлением, требующим быстрого внедрения цифровых решений и искусственного интеллекта во все сферы деятельности отрасли [1]. Эта тенденция особенно актуальна для сектора мелкого рогатого скота, в частности, молочного овцеводства, где инновации могут существенно поднять эффективность и конкурентоспособность.

Применение цифровых технологий в молочном овцеводстве предоставляет широкие возможности для оптимизации рабочих процессов. Системы отслеживания состояния здоровья животных, основанные на датчиках и анализе данных, позволяют оперативно выявлять заболевания и предотвращать их распространение, тем самым снижая потери в производстве [2]. Точное кормление, основанное на сведениях о потребностях животных и составе кормов, способствует увеличению надоев и улучшению качества молока. Автоматизация процессов доения и переработки молока дает возможность снизить трудозатраты и повысить гигиеничность производства.

Цифровые технологии в овцеводстве – это не просто сбор данных [3]. Это комплексный подход, включающий в себя обработку информации, прогнозирование, принятие решений на основе полученных сведений и автоматизацию стандартных операций. Радиочастотные метки и GPS-трекеры позволяют не только определять местоположение животных, но и отслеживать их состояние здоровья, выявлять отклонения в поведении, что особенно важно при пастбищном содержании [4]. Автоматизированные комплексы стрижки и доения значительно уменьшают трудозатраты и повышают качество продукции.

Системы электронной идентификации животных позволяют создавать подробные базы данных о каждом животном, отслеживать его происхождение, генеалогию, продуктивность и состояние здоровья. Это значительно упрощает учет, контроль и прослеживаемость продукции, что особенно важно для соответствия требованиям потребителей и контролирующих органов.

Основная часть.

Цифровизация овцеводства представляет собой стратегически важный шаг для повышения эффективности и рентабельности отрасли в условиях современной экономики [5]. Внедрение цифровых технологий позволяет оптимизировать процессы управления стадом, контроля за здоровьем животных, учета кормов и других ресурсов.

Таблица 1

Преимущества цифровизации и трудности реализации

Преимущества цифровизации	Трудности реализации
Повышение продуктивности	Высокие на начальном этапе затрат
Снижение трудозатрат	Необходимость обучения персонала
Беспрерывное производство продукции	Зависимость от энергоснабжения и иного вида сырья

Мониторинг здоровья животных с помощью датчиков и сенсоров позволяет оперативно выявлять заболевания на ранних стадиях, что снижает необходимость использования антибиотиков и повышает качество продукции. Автоматизированные системы управления стадом, основанные на анализе данных, позволяют принимать обоснованные решения по оптимизации процессов разведения, кормления и ухода за животными [6]. Все это в совокупности способствует повышению конкурентоспособности овцеводческих хозяйств.

.



Рис. 1 Новые подходы к организации труда.

Инновационные решения для организации труда в овцеводстве:

Виртуальные ограждения с GPS-ошейниками: Традиционные физические ограждения требуют значительных затрат на установку и обслуживание [7]. Виртуальные ограждения, использующие GPS-ошейники, работающие на солнечных батареях, представляют собой инновационное решение. Ошейники контролируют местоположение животных и, при попытке выхода за заданные границы, подают слабый электрический разряд, стимулируя

их вернуться в пределы пастбища [8]. Это позволяет гибко управлять пастбищами, оптимизировать их использование и снизить затраты на физические ограждения.

Комфортабельные вагончики для чабанов: Обеспечение достойных условий труда чабанов является важным фактором для привлечения и удержания квалифицированных специалистов [9]. Современные вагончики для чабанов, оборудованные солнечными батареями, обеспечивают комфортное проживание вдали от населенных пунктов.

Скутеры для передвижения: Передвижение по пастбищам и обслуживание стада требует значительных физических усилий. Использование скутеров позволяет чабанам быстро и эффективно перемещаться по территории, контролировать состояние животных и пастбищ, а также оперативно реагировать на возникающие проблемы.

Коптеры для контроля за животными и пастбищами: Коптеры (дроны) представляют собой эффективный инструмент для мониторинга больших территорий. Оснащенные камерами высокого разрешения и системами анализа данных, они позволяют чабанам дистанционно контролировать состояние животных, выявлять проблемы со здоровьем, оценивать состояние пастбищ и обнаруживать хищников [10]. Это значительно повышает эффективность контроля за стадом и снижает необходимость в личном присутствии чабана на всех участках пастбища.

Преимущества новых подходов к организации труда:

- *Повышение эффективности работы чабанов*: Цифровые технологии позволяют автоматизировать многие рутинные задачи, освобождая время чабанов для более важных задач, таких как уход за животными и анализ данных.
- *Улучшение условий труда чабанов*: Комфортабельное жилье, средства передвижения и инструменты мониторинга делают работу чабанов более привлекательной и комфортной.
- *Оптимизация использования пастбищ*: Виртуальные ограждения и коптеры позволяют более эффективно управлять пастбищами, предотвращая их перевыпас и обеспечивая устойчивое развитие отрасли.
- *Улучшение благополучия животных*: Дистанционный контроль за здоровьем животных позволяет своевременно выявлять и устранять проблемы, обеспечивая их хорошее самочувствие.
- *Снижение затрат*: Автоматизация процессов, оптимизация использования пастбищ и снижение необходимости в физических ограждениях позволяют снизить затраты на производство.

Выводы

Внедрение цифровых технологий в организацию труда в овцеводстве открывает новые перспективы для повышения эффективности, улучшения условий труда и обеспечения устойчивого развития отрасли. Использование виртуальных ограждений, комфортабельных вагончиков, скутеров и коптеров позволяет чабанам работать более эффективно, комфортно и безопасно.

Дальнейшее развитие и внедрение этих технологий позволит сделать овцеводство более привлекательным и прибыльным видом деятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дадоян, Е. Д. Особенности использования цифровых технологий в овцеводстве и козоводстве / Е. Д. Дадоян // Управление рисками в АПК. – 2024. – № S3(53). – С. 278-282. – EDN BGSNOX.

2. Г.И. Шичкин, Г.Ф. Сафина, Х.А. Амерханов, В.В Чернов, Л.Н. Григорян, Г.Н. Хмелевская, С.А. Хататаев, А.В. Равичева, Н.Г Степанова – Ежегодник по племенной работе в овцеводстве и козоводстве в хозяйствах Российской Федерации, Москва-2023, 324 с.

3. Волченкова, А. С. Концептуальные основы оценки технологического развития сельского хозяйства / А. С. Волченкова // Вклад науки и практики в обеспечение продовольственной безопасности страны при техногенном ее развитии : Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Брянск, 18–19 марта 2021 года. – Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2021. – С. 227-230. – EDN AMAIWB.

4. Иванов, Ю. А. Новые технологии в животноводстве / Ю. А. Иванов // Техника и оборудование для села. – 2010. – № 1. – С. 36-39. – EDN KZWFOX.

5. Мирзоянц, Ю. А. Инновационные технологии производства продукции овцеводства / Ю. А. Мирзоянц // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2016. – № 3(23). – С. 51-56. – EDN UAZLVS.

6. Миронцов, О. В. Об использовании ресурсов цифровизации и искусственного интеллекта в овцеводстве / О. В. Миронцов, П. П. Корниенко // Актуальные вопросы сельскохозяйственной биологии. – 2024. – № 4(34). – С. 73-76. – EDN YBLKQB.

7. Ловчикова, Е. И. Цифровые технологии развития отрасли овцеводства / Е. И. Ловчикова, Г. П. Зверева, А. С. Волченкова // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : Материалы XIV Международной научно-практической Интернет-конференции, Московская обл., Пушкинский р-н, рп. Правдинский, 07–09 июня 2022 года. – Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2022. – С. 455-460. – EDN PKXNLN.

8. А. Я. Куликова, А.М. Патиева, Н.И. Куликова - Овцеводство и козоводство: учеб. - метод. пособие/ Н.И. Куликова. - Краснодар: КубГАУ, 2017. 193 с.

9. Морозов, Н. М. Цифровые автоматизированные технологии в животноводстве - основа модернизации отрасли / Н. М. Морозов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2018. – № 2(30). – С. 61-69. – EDN XREBWP.

10. Чуба, А. Ю. Современные тенденции развития рынка фермерской продукции овцеводства / А. Ю. Чуба, О. В. Кирилова // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15, № 4. – EDN VMPVCV.

Карпова Екатерина Дмитриевна, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией перспективных молочных ресурсов ВНИИОК – филиала ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ», Россия 355017, г. Ставрополь, ул. Зоотехнический переулок, 15, тел.: +7 (988) 094-31-21, karpova@fnac.center.

Суров Александр Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, директор, главный научный сотрудник ВНИИОК – филиала ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ», Россия 355017, г. Ставрополь, ул. Зоотехнический переулок, 15, тел.: +7 (865) 271-70-33, a.surov@fnac.center.

Фирсова Анна Максимовна, младший научный сотрудник лаборатории перспективных молочных ресурсов ВНИИОК – филиала ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ», Россия 355017, г. Ставрополь, ул. Зоотехнический переулок, 15, тел.: +7 (988) 626-56-80, anya-zinoveva_2001@mail.ru.

Ekaterina Dmitrievna Karpova, Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Advanced Dairy Resources at VNIIOOK– branch of the North Caucasus Federal National Research University, 15 Zootechnicheskiy Pereulok, Stavropol, 355017, Russia, tel.: +7 (988) 094-31-21, karpova@fnac.center.

Alexander Ivanovich Surov, Doctor of Agricultural Sciences, Director, Chief Researcher of the VNIIOOK branch of the North Caucasus Federal National Research University, 15 Zootechnicheskiy Pereulok, Stavropol, 355017, Russia, tel.: +7 (865) 271-70-33, a.surov@fnac.center.

Firsova Anna Maksimovna, Junior Researcher at the Laboratory of Advanced Dairy Resources of VNIIOOK– a branch of the North Caucasus Federal National Research University, 15 Zootechnicheskiy Pereulok, Stavropol, 355017, Russia, tel.: +7 (988) 626-56-80, anya-zinoveva_2001@mail.ru.

УДК 004.056+519.83

Батычко Николай Николаевич

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ОРГАНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В статье рассмотрены современные проблемы управления информационной безопасностью предприятий, существующие методы оценки рисков реализации угроз, влияющих на её обеспечение. Выделены основные типы источников угроз, а также объекты угроз, связанные с информационными активами. Представлены наиболее часто встречающиеся методы математического моделирования, включая теоретико-игровые модели, использующиеся при решении задач управления информационной безопасностью предприятий, в том числе при определении объема инвестиций в обеспечение безопасности информационных активов. С целью оптимизации затрат и повышения безопасности информационных активов проанализированы возможности, преимущества и проблемы применения таких методов. Предложено комплексное использование способных дополнить друг друга игровых моделей при решении задач информационной безопасности предприятий, обеспечивающее возможность создания рассчитанной на предотвращение угроз любой степени сложности системы поддержки принятия решений в виде персонального мини-приложения или облачной платформы.

Безопасность информационных систем, управление информационной безопасностью, несанкционированный доступ, теория игр.

Batychko Nikolay Nikolaevich

METHODS OF MATHEMATICAL MODELING IN THE ORGANIZATION OF INFORMATION SECURITY MANAGEMENT OF MODERN ENTERPRISES

A The article considers modern problems of enterprise information security management, existing methods of risk assessment of threat realisation risks affecting its provision. The main types of threat sources and threat objects related to information assets are highlighted. The most common methods of mathematical modelling are presented, including game-theoretic models used in solving the problems of information security management of enterprises, including in determining the amount of investment in ensuring the security of information assets. In order to optimise costs and improve the security of information assets, the possibilities, advantages and problems of using such methods are analysed. The complex use of game models capable of complementing each other in solving the problems of information security of enterprises is proposed, which provides the possibility of creating a decision support system designed to prevent threats of any degree of complexity in the form of a personal mini-application or cloud platform.

Information systems security, information security management, unauthorised access, game theory.

Введение

В Обеспечение информационной безопасности – один из важнейших аспектов деятельности работающего в цифровой плоскости современного предприятия [1]. К числу наиболее часто встречающихся источников угроз можно отнести промышленный шпионаж, утечку персональных данных, мошеннические действия инсайдеров, атаки хакеров, информационные войны, ошибки персонала. Основные объекты угроз, связанных с информационными активами, – аппаратное и программное обеспечение информационной системы, носители информации, базы данных компаний, их деловая репутация, информация о применяемых ими технологиях, о бизнес-процессах и сотрудниках, интеллектуальная собственность, операционный бюджет, персонал, доступность и конфиденциальность информации.

Автоматизация процессов реагирования на кибератаки, повышение эффективности защиты информационных активов предприятий усложняет реализацию угроз, требует от злоумышленников более серьёзной подготовки и, как следствие, одновременно повышает потребность предприятий в мощной оперативной защите активов, в увеличении направленных на защиту бюджетов, во внедрении новых решений. Объём мирового рынка ИБ-услуг растёт на 15–20% в год [2]. В среднем для обеспечения информационной безопасности российские компании, каждая вторая из которых хотя бы раз в год подвергается атаке, используют 10–30 продуктов, при этом из-за накопления злоумышленниками опыта атак и возрастания объёма потенциального ущерба при повышении сложности информационных активов их уровень защищённости не гарантирует киберустойчивости [3].

Современные системы обеспечения информационной безопасности практически не учитывают значимости реализации угроз для экономики предприятия в каждом отдельном случае, влияния человеческого фактора. Вложенные в обеспечение информационной безопасности средства используются не всегда эффективно. Результаты исследований, посвящённых применению в оценке рисков методов математического моделирования, в том числе теоретико-игровых моделей, наглядно иллюстрируют возможность найти оптимальное решение для обеспечения достаточного уровня защищённости информационных активов предприятия при любом количестве и типе рисков реализации угроз.

Некоторые виды игровых моделей

Единой классификации теоретико-игровых моделей не существует. Игровая модель может создаваться для прогнозирования вероятности реализации угрозы, общей оценки уязвимости системы по какому-то одному или нескольким критериям, описывать взаимодействие защиты и нападения, процесс распределения и использования средств, ресурсов, выделяемых на

обеспечение безопасности информационных активов, поиск решения, позволяющего обеспечить установленный законодательно класс информационной безопасности при минимуме вложений.

Модели с одним защитником и одним атакующим

В рамках многих теоретико-игровых моделей стратегия игры рассматривается как взаимодействие защитника и нападающего, позволяющее рассмотреть вопрос безопасности не только одного, но и нескольких компонентов информационной системы предприятия, один или несколько типов угроз. Примером модели двух игроков может стать модель распределения инвестиций в информационную безопасность с учётом значимости рисков [4], биматричная игра, моделирующая конфликт между информационной системой предприятия и внешним источником угроз, целью которой является минимизация суммарных рисков.

Определение равновесий по Нэшу в процессе анализа множества возможных версий развития событий, полученных в результате игрового взаимодействия агрессивной внешней среды и информационной системы, даёт возможность откорректировать стратегию защиты активов [5]. На основе базовой статической модели двух игроков можно создать повторяющуюся и динамическую игру.

Защита нескольких компонентов системы информационной безопасности

Модели более чем с двумя защитниками или атакующими наилучшим образом представлены играми Штакельберга. Модель Штакельберга – это игра лидера и ведомого, где защитник-лидер определяет смешанную стратегию, на которую ориентируются разнородные защитники-ведомые или атакующие-ведомые, чтобы максимизировать свои выигрыши [6]. Лидер распределяет ресурсы защиты между конечным набором целей. Злоумышленник в данном случае в роли последователя наблюдает за процессом распределения и атакует самую уязвимую цель, применив чистую стратегию.

Байесовские игры Штакельберга позволяют учитывать случайно выбранных ведомых с собственными матрицами вычислений. Игры безопасности Штакельберга могут использоваться при множественном типе атак, например, для вычисления оптимального распределения средств, направленных на защиту информационных активов финансовых систем. Для поиска наилучшей стратегии лидера нужно найти сильное равновесие Штакельберга. Чтобы сократить время расчётов множество задач линейного программирования преобразуют в одну задачу целочисленного [7].

Моделирование стратегии защиты и нападения в информационной войне

Объединив теорию игр и OODA-петлю, можно построить не только дерево рисков, но и дерево атак, количественно оценить стратегии защиты и атаки, смоделировать хакерскую войну, основным оружием которой является

информация, обеспечить практически в любом её виде информационное превосходство и стабильное доминирующее положение. Риск при моделировании атаки рассчитывается как произведение её стоимости и вероятности успешной реализации. Платёж атакующей стороны – причинённый жертве ущерб. Для каждого вида информационной войны разрабатывается своя стратегия [8].

Построение теоретико-игровой модели, представляющей собой динамическую игру с атакующим и защищающимся рациональными игроками, даёт возможность не только контролировать способность противника реагировать на ситуации и принимать решения, но и понять, как он будет действовать, правильно организовать защиту, спланировать максимально эффективное нападение, способное разорвать его цикл OODA, вызвать хаос, лишить способности принимать решения, саботировать бизнес-операции, нанести экономический ущерб, замедлить техническое развитие, если речь идёт о долгосрочной информационной войне.

Репутационные модели

В качестве угрозы в играх с неполной информацией о стратегиях и выигрышах соперников может рассматриваться, например, потеря сетевым онлайн-сервисом репутации из-за утечки личных данных пользователя, спровоцированной злоумышленником [9]. Основными поведенческими реакциями, влияющими на принятие решения в моделях с тремя рациональными игроками, включающими игры «злоумышленник–защитник» и «пользователь–провайдер», где вложение средств в конфиденциальность и сохранение репутации гарантирует получение выигрыша – экономической выгоды, являются доверие и факторы, имеющие возможность повлиять на оценку пользователями риска.

За основу репутационной модели, игроками которой являются защитник и подозреваемый, но не обязательно злоумышленник, можно взять описывающее стратегии игроков во времени и позволяющее сделать выбор, опираясь на выбор оппонента, марковское последовательное равновесие [10]. Преимущества – выбор зависит только от текущего состояния системы, есть возможность рассматривать утечку информации в долгосрочной перспективе. Наличие неопределённости увеличивает сложность стратегического анализа для игрока, которому неизвестно, кто перед ним.

Модели, разработанные с учётом требований законодательства

Игровая модель взаимодействия информационной системы предприятия, стратегия которого определяется установленными государством требованиями к классу защиты конфиденциальной информации, вероятностью несанкционированного доступа к ней или перехвата, должна опираться на принципы упреждения, учитывать возможность проверить наличие разрешения на обработку, уточнять место расположения сервера, где она будет храниться [11].

Модель такого типа может стать компонентом комплексной системы защиты информационных активов предприятия. Её также можно рассматривать, как одну из версий репутационных моделей, в рамках которой моделируются игры «пользователь-предприятие», «злоумышленник-предприятие», «государство-предприятие».

Эволюционные модели

Теоретико-игровые эволюционные модели с различными механизмами поощрения и наказания дают возможность прогнозировать равновесие и устойчивость отношений в системах типа муниципалитет-предприятие [12], партнёрских или кооперативных отношений в рамках управления информационной безопасностью, выбрать оптимальный механизм наказания и поощрения для системы государство-индивидуум [13] или начальник-подчинённый, если речь идёт о рисках, обусловленных, например, пренебрежением элементарными мерами защиты информации на конкретном предприятии.

Как компонент комплексной системы защиты информационных активов предприятия эволюционные игры можно использовать при моделировании отношений начальник-подчинённый или кооперативных отношений, приоритетом которых могут являться не только рациональные действия, но и стратегии поведения [14], характерные для каждого из игроков.

Модели, позволяющие оптимально распределить инвестиции в информационную безопасность

Разработка теоретико-игровой модели управления информационной безопасностью предприятия даёт возможность не только оценить риски реализации угроз и вероятность отражения атак с учётом выбранных игроками стратегий, но и рассчитать на основании этих данных величину ущерба, который может нанести повреждение актива, построить платёжную матрицу, получив возможность распределить вкладываемые в обеспечение информационной безопасности средства в соответствии со степенью риска, таким образом минимизировав его [4].

Построение комплексной модели, представляющей собой многопараметрическую задачу линейного программирования, с учётом организации информационной системы предприятия, его ресурсов, специфики его бизнес-процессов, уязвимостей и возможных атак злоумышленников позволит как определить бюджет расходов на восстановление активов в случае реализации угроз, на поддержание их работоспособности, так и оценить экономический потенциал предприятия, его инвестиционную привлекательность, рассчитать риски финансовых потерь в задачах бизнес-планирования [15].

Оптимизация защиты устройств

В качестве комплекса нуждающихся в защите информационных активов можно рассмотреть ноутбуки и смартфоны, в которых хранится большой объём

конфиденциальных данных их владельцев, беспроводные системы связи для беспилотных автомобилей, через которые проходит огромный поток информации. Модель разрабатывается с учётом мощности вычислительных ресурсов устройства, дополнительных угроз, связанных с возможностью изменения количества и нарушения целостности установленных приложений, кражи аппарата, подключения к беспроводным сетям.

Для решения задачи оптимизации защиты мобильных устройств посредством распределения ресурсов системы защиты между активами активы разбивают на классы с равной степенью защиты, позволяющей предсказать результат нападения при наличии информации о стратегии злоумышленника и выбрать сторону нападения при отсутствии таких данных [16].

Разработка комплексной модели

Оптимальным по Парето с точки зрения защиты и инвестиционных затрат решением задачи управления информационной безопасностью предприятия является создание многокомпонентной системы, включающей модели, разработанные с учётом возможности появления новой информации, новых событий, целей разных типов, отличающихся экономической ценностью, влиянием человеческого фактора.

Количественная и комплексная оценка рисков

Во многих случаях для количественной оценки величины риска используется упрощённая формула

$$R = V \times C, \tag{1}$$

или

$$R = T \times V \times C, \tag{2}$$

где T – вероятность успешной реализации угрозы в процентном или количественном выражении за определённый период; V – вероятность успешной реализации угрозы с использованием конкретной уязвимости, измеряющаяся числом от 0 до 1; C – последствия, которые можно рассматривать как ущерб, экономическую стоимость замещения повреждённого актива, % снижения оборота, продаж, контрактов, как утрату конкурентоспособности, долговременную потерю доверия клиентов.

Сумма ущерба или затрат на устранение угрозы определяется по формуле

$$R = \sum_{i=1}^{n} R_i = \sum_{i=1}^{n} T_i V_i C_i\,, \tag{3}$$

где R_i – стоимость отдельных рисков.

Учитывая при построении модели и определении количественной оценки величины риска и суммы ущерба возможность атаки одновременно на несколько компонентов одного типа, вероятную последовательность её этапов, отличия в методах атак, поведении защитников и злоумышленников,

продолжительность инцидентов и их последствия в применении к конкретному предприятию или к конкретной ситуации, можно получить более точный результат.

Построение модели, например, в форме матричной или биматричной игры даёт возможность найти оптимальную стратегию отражения атаки, предупреждения риска или распределения выделенных на обеспечение информационной безопасности средств по активам с учётом вероятности нападения на актив, вероятности отражения атаки, ущерба, который понесёт предприятие, если угроза будет реализована.

Таблица 1

Пример платёжной матрицы биматричной теоретико-игровой модели, позволяющей сопоставить распределение инвестиций с размерами ущерба, который нанесёт реализация угрозы в отношении каждого актива

Стратегия*	Актив 1, тыс. руб.	Актив 2, тыс. руб.	Актив 3, тыс. руб.	Актив 4, тыс. руб.
1 (10/40/30/20)	80 50	175 200	500 150	4000 100
2 (15/30/40/15)	90 75	175 150	1000 200	3000 75
3 (20/35/35/10)	150 100	175 175	800 175	2000 50

* В скобках указано распределение денежных средств по основным активам в % от запланированного бюджета, обеспечивающее снижение общего риска на 80–90%.

Представленная выше матрица игровой модели наглядно демонстрирует, что далеко не во всех случаях вкладывать средства в обеспечение информационной безопасности, ориентируясь лишь на максимально возможное снижение риска реализации угрозы, выгодно. В защиту Актива 1 нет смысла вкладывать средства. Ущерб в случае реализации угрозы будет незначительным. Актив 2 представлен оборудованием. Его стоимость практически не отличается от размера инвестиций в защиту.

Выводы

В отличие от результатов, которые в состоянии предложить наиболее часто использующиеся на предприятиях системы обеспечения информационной безопасности, оценивающие степень защиты активов в соответствии со стандартами разработчиков таких систем, но без учёта реальной вероятности реализации угроз, построение математических игровых моделей позволяет управлять безопасностью информации, ориентируясь на значимость рисков для самого предприятия.

Такой подход даст возможность подобрать инновационный, нестандартный вариант комплексной динамической защиты при меньших

инвестициях в информационную безопасность, с учётом специфики бизнес-процессов предприятия. Позволит разработать систему поддержки принятия решений, рассчитанную на неограниченное количество моделей рисков разного типа, обеспечивающую возможность моделирования ситуаций любой сложности, и реализовать её, например, в виде персонального мини-приложения или облачного сервиса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сколько стоит информационная безопасность // Positive Technologies URL: https://ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/is-cost-2017/ (дата обращения 07.05.2025).

2. Информационная безопасность (мировой рынок) // TAdviser URL: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%98%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B1%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D0%BF%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_(%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA) (дата обращения 07.05.2025).

3. Есть ли необходимость в автоматизации тестирования на проникновение // Positive Technologies URL: https://ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/est-li-neobhodimost-v-avtomatizacii-testirovaniya-na-proniknovenie/#id1 (дата обращения 07.05.2025).

4. Юрьев В.Н. Игровой подход к оценке риска и формированию бюджета информационной безопасности предприятия // Прикладная информатика / Journal of Applied Informatics, 2015, №2(56) . – С.121–126 URL: http://beta.appliedinformatics.ru/general/upload/articles/p121-126-renamed.pdf (дата обращения 07.05.2025).

5. Конюховский П. В., Шабалин А.А Теоретико-игровые подходы в анализе стратегий защиты корпоративных информационных систем // International Journal of Open Information Technologies, 2023, Т.11, №12. – С.4–15. – EDN OCBBBA.

6. Abrahamyan A. A. Stackelberg Security Games for Information Security Management of Financial Systems //Mathematical Problems of Computer Science, 2014, Т.41. – С.74–80.

7. Абраамян А.А. Управление информационной безопасностью с использованием игр безопасности Штакельберга. – Europejska Nauka XXI powieką-2014 : Materiały X międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji, Przemyśl, 07–15 мая 2014 года. – Przemyśl: Nauka i studia, 2014 URL: http://www.rusnauka.com/14_ENXXI_2014/Informatica/4_169281.doc.htm (дата обращения 12.05.2025).

8. Jormakka J., Jolsa J. Modelling information warfare as a game // J Inf Warfare, 2005, № 4. – С.12–25.

9. Njilla L.Y., Pissinou N., Makki K. Game theoretic modeling of security and trust relationship in cyberspace // International Journal of Communication Systems, 2016, №29. – С.1500–1512.

10. Han K., Choi J.H. A Reputation Game on Cyber-Security and Cyber-Risk Calibration // Applied Mathematics & Optimization, 2022, Т.85, №13.

11. Унижаев Н.В. Особенности моделирования угроз безопасности персональных данных для обеспечения достаточного уровня защищенности // Вопросы инновационной экономики, 2022, Т.12, №1. – С.95–110.

12. Yihang Guo, Kai Zou, Chang Liu, Yingzi Sun Study on the Evolutionary Game of Information Security Supervision in Smart Cities under Different Reward and Punishment Mechanisms // Discrete Dynamics in Nature and Society, 2022.

13. Isakov A., Rand D.G. The Evolution of Coercive Institutional Punishment // Springer Science+Business Media, LLC, 2011.

14. Hu H., Liu Y.L., Chen C., Zhang H.Q., Liu Y. Optimal Decision Making Approach for Cyber Security Defense Using Evolutionary Game // IEEE Transactions on Network and Service Management, 2020, №17. – С.1683–1700

15. Иванченко П.Ю., Кацуро Д.А., Медведев А.В., Трусов А.Н. Математическое моделирование информационной и экономической безопасности на предприятиях малого и среднего бизнеса // Фундаментальные исследования, 2013, №10–13. – С.2860–2863 URL: https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=32923 (дата обращения 07.05.2025).

16. Быков А.Ю., Крыгин И.А., Муллин А.Р. Алгоритмы распределения ресурсов системы защиты между активами мобильного устройства на основе игры с нулевой суммой и принципа равной защищенности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2018, №2 (119). – С.48–68.

Автор: Батычко Николай Николаевич, аспирант кафедры прикладной математики и программирования Института математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича Южного федерального университета, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова 8а, 344090, email: nbatychko@sfedu.ru.

Author: Batychko Nikolay Nikolaevich, postgraduate student of the Department of Applied Mathematics and Programming of the Institute of Mathematics, Mechanics, and Computer Science named after I.I. Vorovich Southern Federal University, 344090, Russia, Rostov-on-Don, 8a Milchakova street, email: nbatychko@sfedu.ru.

УДК 620.91

Кузьмин Кирилл Андреевич

СИСТЕМА ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Работа посвящена анализу перспектив использования возобновляемых источников энергии для питания зарядных станций электромобилей в городской среде. Рассматриваются основные тенденции роста популярности электромобилей и связанные с этим вызовы развития необходимой инфраструктуры. Проведён сравнительный анализ применения солнечных панелей и ветрогенераторов для автономного электроснабжения зарядных станций. Показано, что использование солнечных панелей является более предпочтительным решением в условиях города благодаря меньшему экологическому воздействию, простоте установки и эксплуатации. Обосновывается, что применение солнечных технологий позволяет создавать устойчивую и экономически эффективную инфраструктуру для зарядки электромобилей, способствуя снижению углеродного следа и повышению энергетической независимости городов.

Электромобиль, зарядная станция, солнечная панель, возобновляемый источник энергии, городская среда, экологическая устойчивость.

Kuzmin Kirill Andreevich

ELECTRIC VEHICLE CHARGING SYSTEM BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES

The work is devoted to analyzing the prospects of using renewable energy sources to power electric vehicle charging stations in urban environments. The main trends in the growing popularity of electric vehicles and the associated challenges of developing the necessary infrastructure are considered. A comparative analysis of the use of solar panels and wind generators for autonomous power supply of charging stations is carried out. It is shown that the use of solar panels is a more preferable solution in urban conditions due to lower environmental impact, ease of installation and operation. It is substantiated that the use of solar technologies allows the creation of a sustainable and cost-effective infrastructure for charging electric vehicles, contributing to the reduction of carbon footprint and increasing the energy independence of cities.

Electric vehicle, charging station, solar panel, renewable energy source, urban environment, environmental sustainability.

Введение

В последние годы наблюдается значительный рост популярности электромобилей, что связано с усилением экологической осведомленности, развитием технологий и поддержкой правительств. Согласно исследованию Международного энергетического агентства (IEA) [1], в 2023 году по всему

миру было зарегистрировано почти 14 миллионов новых электромобилей, в результате чего их общее количество на дорогах достигло 40 миллионов. Продажи электромобилей в 2023 году были на 3,5 миллиона выше, чем в 2022 году, что на 35% больше, чем в прошлом году. Это более чем в шесть раз больше, чем в 2018 году, всего пятью годами ранее. Эти тенденции указывают на то, что рост остаётся стабильным по мере развития рынков электромобилей. Этот рост обусловлен не только снижением стоимости аккумуляторов, но и введением строгих экологических норм, направленных на сокращение выбросов парниковых газов. Например, в Европейском союзе действуют директивы, обязывающие автопроизводителей постепенно отказываться от двигателей внутреннего сгорания к 2035 году [2].

Однако рост числа электромобилей ставит перед обществом новые вызовы, одним из которых является необходимость развития инфраструктуры зарядных станций. В статье [3] подчёркивается, что отсутствие достаточного количества зарядных станций может стать серьёзным препятствием для массового перехода на электромобили, особенно в регионах с неразвитой инфраструктурой. Увеличение числа станций требует значительных инвестиций, но также открывает возможности для интеграции возобновляемых источников энергии. Это позволяет не только решить проблему зарядки, но и минимизировать углеродный след самой инфраструктуры.

Основная часть

При рассмотрении вопроса использования возобновляемых источников энергии для питания зарядных станций электромобилей в городской среде, наиболее подходящими для этой задачи являются солнечные панели и ветрогенераторы. Анализ научной литературы показал, что солнечные панели имеют ряд преимуществ перед ветрогенераторами. Эти преимущества связаны с особенностями городской инфраструктуры и экологическими ограничениями.

Малые ветроустановки необходимо устанавливать в городских районах, где можно эффективно использовать энергию городского ветра. Следовательно, выбор места для установки диктуется соображениями производительности. Однако при планировании необходимо учитывать микромасштабные экологические эффекты. Городские ветроустановки влияют на местную окружающую среду, поскольку они увеличивают мертвую нагрузку на здания (при их установке на фасаде зданий), вызывают вибрации, потенциально способствуют визуальному и звуковому загрязнению, а также могут стать причиной гибели птиц [4]. Некоторые из этих эффектов являются немедленными, а другие – долгосрочными.

При работе в условиях сильного турбулентного ветра, как это бывает в городской среде, конструкции ветроустановок должны быть достаточно прочными, чтобы выдерживать мгновенные и долгосрочные ветровые нагрузки, а также порывы ветра [5]. Из-за эффекта ветрового момента ветрогенераторы также могут создавать прерывистые нагрузки на конструкцию.

Малые ветроустановки, как и большие ветряные турбины, могут влиять на ветровой поток, а значит, и на микроклимат [6]. В ходе исследования с

использованием CFD-моделирования [7] было установлено, что малые городские ветроустановки, установленные на крыше, не влияют на ветер на уровне пешеходов, но могут оказывать значительное влияние на скорость ветра и турбулентность над крышами. Другое исследование [8], проведенное также с помощью CFD-моделирования с использованием метода усредненного Рейнольдса-Навье-Стокса, показало, что ветроустановки на крыше ослабляют нисходящее движение здания, а турбулентная кинетическая энергия за ветроустановками на крыше значительно увеличивается, что приводит к более сильному вертикальному рассеиванию загрязняющих веществ. В работе [9], используя анемометрические измерения, обнаружили, что форма крыши влияет на скорость ветрового потока и интенсивность турбулентности. Размещение малых ветроустановок может влиять на местные ветровые режимы, оказывая тем самым вторичное воздействие на микроклимат и рассеивание загрязняющих веществ.

В связи с этим можно сделать вывод, что солнечные панели в городской среде являются более предпочтительным вариантом по сравнению с ветрогенераторами для питания зарядных станций электромобилей по причине меньшего воздействия на окружающую среду и микроклимат [10].

Также если ветрогенераторы требуют тщательного выбора места установки для обеспечения эффективности работы и минимизации экологических рисков, то солнечные панели, напротив, могут быть установлены практически на любой поверхности, ориентированной на солнце, включая крыши зданий, парковки и другие доступные площади. Это позволяет максимально использовать доступное пространство без необходимости выделения новых территорий. Поэтому солнечные панели считаются более надежными и долговечными поскольку не требуют сложных технических решений для защиты от внешних факторов.

В данной работе предлагается использовать зарядные станции на постоянном токе для увеличения скорости зарядки электромобиля. Традиционные зарядные устройства на переменном токе требуют дополнительного преобразования энергии через бортовой преобразователь электромобиля, что ограничивает скорость зарядки и увеличивает потери энергии. В отличие от них, зарядные станции на постоянном токе подают электроэнергию напрямую в аккумуляторную батарею электромобиля, минуя этап преобразования, что позволяет значительно сократить время зарядки, особенно при использовании станций высокой мощности, которые способны обеспечивать токи до нескольких сотен ампер и уменьшить время простоя электромобилей во время зарядки, что позволяет быстро пополнить запас энергии и продолжить путь.

Структурная схема подобной заправочной станции на основе использования фотоэлектрических панелей в качестве возобновляемого источника, представлена на рисунке 1.

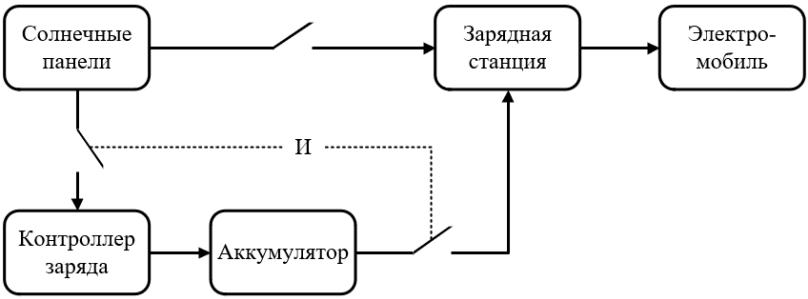


Рис. 1 Структурная схема автономной заправочной станции электромобилей на основе солнечных панелей

Принцип её работы заключается в следующем. Поскольку выработка солнечной электроэнергии напрямую зависит от наличия солнечного света, возникает необходимость её хранения для обеспечения стабильной работы в условиях низкой освещённости – в пасмурные дни или ночное время суток.

Для решения этой задачи в системе предусмотрено использование аккумуляторных батарей для накопления избыточной энергии в течение солнечного дня. Это позволит использовать её для зарядки электромобилей в любое время суток. Кроме того, когда аккумуляторы уже заряжены, в моменты максимальной генерации энергии, имеется возможность осуществлять зарядку транспортных средств напрямую от солнечных панелей, что повышает общую эффективность использования возобновляемого источника.

Выводы

Рост популярности электромобилей стал неотъемлемой частью глобального перехода к экологически чистым технологиям. Однако для успешной реализации этого перехода необходимо решить ключевые проблемы, такие как развитие инфраструктуры зарядных станций.

Использование солнечных панелей для питания этих станций предлагает устойчивое и экономически эффективное решение, которое способствует снижению углеродного следа и повышению энергетической независимости. Они лучше соответствуют пространственным ограничениям, имеют меньшее экологическое воздействие и обеспечивают стабильную выработку энергии. Эти преимущества делают солнечные панели ключевым элементом развития устойчивой инфраструктуры для электромобилей в городах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Trends in electric cars – Global EV Outlook 2024 – Analysis - IEA URL: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars (дата обращения: 27.04.2025).

2. Fit for 55. European Climate Law URL: https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/ ()/ (дата обращения: 25.04.2025).

3. Sovacool B. K., Baum C. M., Low S. Determining our climate policy future: Expert opinions about negative emissions and solar radiation management pathways //Mitigation and adaptation strategies for global change. – 2022. – Т. 27. – №. 8. – С. 58.

4. Mokarram M., Pourghasemi H. R., Mokarram M. J. A multi-criteria GIS-based model for wind farm site selection with the least impact on environmental pollution using the OWA-ANP method //Environmental Science and Pollution Research. – 2022. – Т. 29. – №. 29. – С. 43891-43912.

5. Anup K. C., Whale J., Urmee T. Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review //Renewable energy. – 2019. – Т. 131. – С. 268-283.

6. Boettcher M. et al. Influence of large offshore wind farms on North German climate //Meteorologische Zeitschrift. – 2015. – Т. 24. – С. 465-480.

7. Zhang S. et al. Study on the operation of small rooftop wind turbines and its effect on the wind environment in blocks //Renewable Energy. – 2022. – Т. 183. – С. 708-718.

8. Zhang S. et al. Effects of a rooftop wind turbine on the dispersion of air pollutant behind a cube-shaped building //Theoretical and Applied Mechanics Letters. – 2021. – Т. 11. – №. 5. – С. 100296.

9. Peppoloni M., Hirschl A., Leonhartsberger K. Operational behaviour of SWT //Wind Energy Exploitation in Urban Environment: TUrbWind 2017 Colloquium 1. – Springer International Publishing, 2018. – С. 45-56.

10. Masson V. et al. Solar panels reduce both global warming and urban heat island //Frontiers in Environmental Science. – 2014. – Т. 2. – С. 14.

Автор: Кузьмин Кирилл Андреевич, магистрант кафедры электротехники и мехатроники Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (8364) 371-694, email: kikuzmin@sfedu.ru.

Author: Kuzmin Kirill Andreevich, Master's student of the Department of Electrical Engineering and Mechatronics, Institute of Radio Engineering Systems and Control, Southern Federal University, Russia, Taganrog, Shevchenko Street 2, 347922, phone: +7 (8364) 371-694, e-mail: kikuzmin@sfedu.ru.

УДК 621.396

Кузьмин Евгений Всеволодович, Тимохин Никита Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДАННЫХ ГНСС-РЕФЛЕКТОМЕТРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЮДЖЕТНОГО НАВИГАЦИОННОГО ПРИЕМНИКА

В данной работе рассматривается возможность применения недорогих ГНСС-приемников для задач рефлектометрии с целью мониторинга параметров окружающей среды. Проведен анализ аппаратных ограничений бюджетных решений, разработаны алгоритмы обработки данных, формируемых навигационным приёмником. Установлено, что бюджетные приёмники способны фиксировать отраженные сигналы с точностью, достаточной для мониторинга состояния подстилающей поверхности, однако требуются специальные алгоритмы обработки данных.

Ключевые слова: ГНСС-рефлектометрия, бюджетный приёмник, мониторинг подстилающей поверхности, анализ ОСШ, обработка навигационных сигналов.

Kuzmin Evgeny Vsevolodovich, Timokhin Nikita Aleksandrovich

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF OBTAINING GNSS REFLECTOMETRY DATA USING A LOW-COST RECEIVER

This paper examines the possibility of using low-cost GNSS receivers for reflectometry tasks to monitor environmental parameters. An analysis of the hardware limitations of inexpensive solutions is conducted, and algorithms for processing data generated by the navigation receiver are developed. It is established that low-cost receivers are capable of recording reflected signals with an accuracy sufficient for monitoring the state of the underlying surface, but special data processing algorithms are required.

Key words: GNSS reflectometry, low-cost receiver, monitoring of underlying surface, SNR analysis, processing of navigation signals.

Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) традиционно используются для позиционирования и навигации [1]. Помимо этого, отраженные сигналы могут применяться для зондирования подстилающих поверхностей и изучения их свойств – так называемая ГНСС-рефлектометрия (ГНСС-Р) [2–10]. Направленность на возможное широкое применение методов ГНСС-Р обуславливает поиск путей снижения стоимости оборудования, что делает актуальным изучение возможностей использования бюджетных навигационных приемников для ГНСС-рефлектометрии.

Цель работы: оценка возможности применения сравнительно недорогих ГНСС-приемников для регистрации амплитудных изменений смеси прямых и отраженных сигналов и реализации технологии ГНСС-Р.

Основная часть

1. Методы и оборудование.
   1.1. Аппаратная часть. В качестве приемника использовался смартфон Samsung A54 с процессором Exynos 1380. Данный процессор оснащен интегрированным 5G-модемом с поддержкой приёма и обработки сигналов ГНСС [11].
   1.2. Программная постобработка. Аналогично [8; 9] проводилась цифровая постобработка временных рядов значений отношения сигнал/шум (ОСШ) как функции местоположения спутника относительно приемника.
2. Результаты.

Экспериментальное исследование проводилось в январе 2025 года. Тестовая площадка располагалась на открытой местности с низким перепадом высот. Приемник располагался на штативе при высоте 1,8 метра над подстилающей поверхностью. Поверхность земли была покрыта снегом толщиной 8 см. Погода ясная. Порывы ветра 2–3 м/с. Время измерений 2 часа.

На рисунках 1–4 представлены примеры временных зависимостей ОСШ и угла места для случаев обработки сигналов различных ГНСС: рис. 1 – ГЛОНАСС, 2 – GPS, 3 – GALILEO, 4 – BEIDOU (на легенде указаны собственные идентификаторы спутников).

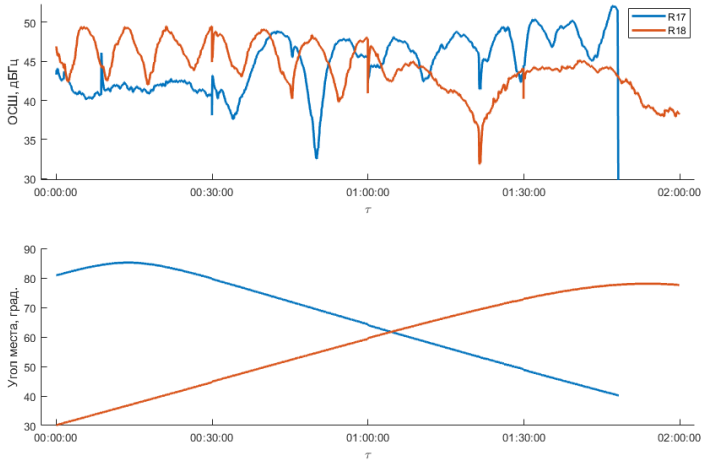


Рис. 1 Временные ряды значений ОСШ как функций времени (чч:мм:сс). Случай обработки сигналов спутников ГНСС ГЛОНАСС

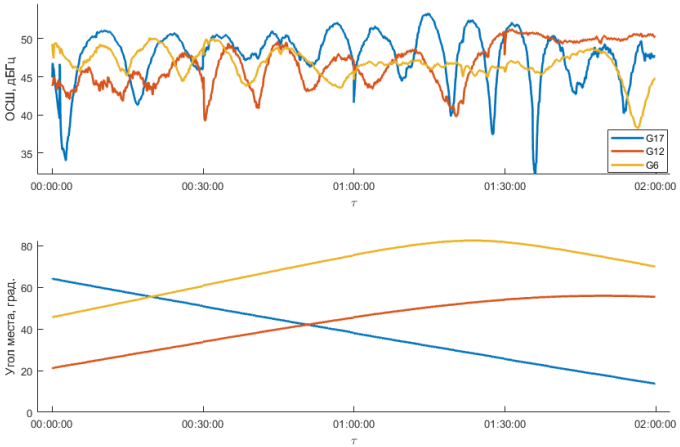


Рис. 2 Временные ряды значений ОСШ как функций времени (чч:мм:сс). Случай обработки сигналов спутников ГНСС GPS

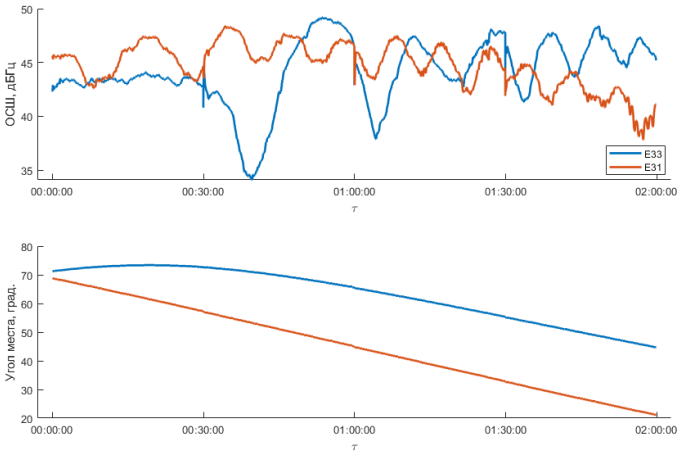


Рис. 3 Временные ряды значений ОСШ как функций времени (чч:мм:сс). Случай обработки сигналов спутников ГНСС GALILEO

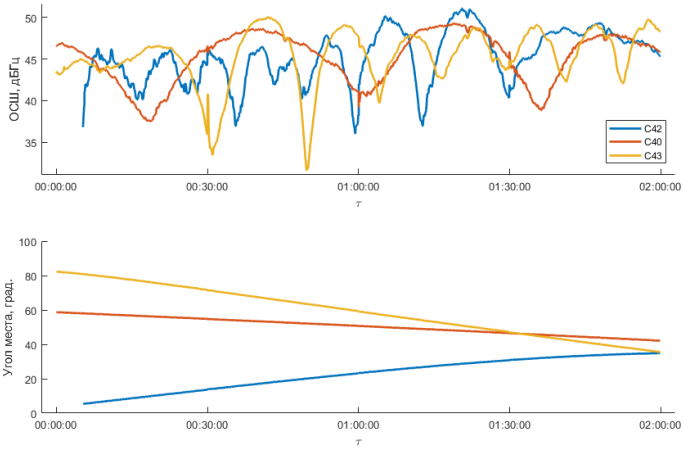


Рис. 4 Временные ряды значений ОСШ как функций времени (чч:мм:сс). Случай обработки сигналов спутников ГНСС BEIDOU

Выводы

Проведенное исследование подтвердило возможность использования недорогих ГНСС-приёмников для решения задач рефлектометрии, однако с некоторыми ограничениями. Ключевыми проблемами являются низкое ОСШ и необходимость разработки специализированных алгоритмов обработки данных. Перспективным направлением представляется создание гибридных систем с использованием нескольких приёмников и методов постобработки результатов для улучшения качества их визуализации и получения косвенных оценок характеристик подстилающей поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.

2. GNSS Remote Sensing / S. Jin, E. Cardellach, F. Xie. – Dordrecht, Heidelberg, New-York, London: Springer, 2014. – 286 p.

3. Кашкин В.Б. Экспериментальное определение электрофизических параметров лесного покрова с использованием сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS / В.Б. Кашкин, В.И. Кокорин, В.Л. Миронов, С.В. Сизасов // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51. – № 7. – С. 825–830.

4. Михайлов М.И. Измерение толщины льда на пресноводном пруде и реке с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS / М.И. Михайлов, К.В. Музалевский, В.Л. Миронов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 2. – С. 167–174.

5. Падохин А.М. GNSS-рефлектометрия уровня Черного моря в экспериментах на стационарной океанографической платформе / А.М. Падохин, Г.А. Курбатов, М.О. Назаренко, В.Е. Смолов // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2018. – № 4. – С. 80–86.

6. Макаров Д.С. Использование сигналов навигационных спутников в мониторинге земных покровов / Д.С. Макаров, А.В. Сорокин, Д.В. Харламов // Сибирский журнал науки и технологий. – 2019. – Т. 20. – № 1. – С. 8–19.

7. Сорокин А.В. Рефлектометрия ледовых покровов при различных сезонных состояниях по сигналам навигационных спутников в L1-диапазоне / А.В. Сорокин, Е.В. Кузьмин, Д.С. Макаров, Д.В. Харламов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VII Междунар. науч. конф. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. – 328 с. – С. 286–289.

8. Кузьмин Е.В. Цифровая фильтрация результатов ГНСС-рефлектометрии / Е.В. Кузьмин, А.В. Сорокин // Цифровая обработка сигналов. – 2021. – №1. – С.51–54.

9. Кузьмин Е.В. Фурье-спектры амплитудных вариаций суперпозиции сигналов навигационных спутников вблизи поверхностей с различными свойствами / Е.В. Кузьмин, А.В. Сорокин // Письма в журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – № 18. – С.26–28.

10. Калинников В. В. Опыт использования метода ГНСС-рефлектометрии для измерения высоты снежного покрова / В. В. Калинников, А. В. Устинов, Н. С. Косарев // Вестник СГУГиТ. – 2023. – Т. 28. – № 1. – С. 6–13.

11. CpuTronic: сайт для сравнения процессоров и электронных компонентов [Электронный ресурс]. – URL: https://cputronic.com/ru/soc/samsung-exynos-1380?ysclid=madgt2xeva395224548 (дата обращения: 07.05.2025).

Авторы: Кузьмин Евгений Всеволодович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Сибирского федерального университета, Россия, город Красноярск, улица Академика Киренского 28, 660074, телефон: +7 (391) 2912272, email: ekuzmin@sfu-kras.ru.

Тимохин Никита Александрович, магистр техники и технологии, инженер радиофизик АО «ЦКБ «Геофизика», Россия, город Красноярск, улица Академика Киренского 89, 660041, телефон: +7 (999) 6402704, email: NTimokhinbox@yandex.ru.

Authors: Kuzmin Evgeny Vsevolodovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor of radioengineering department of the Siberian Federal University, 660074, Russia, Krasnoyarsk, 28 Akademika Kirenskogo street, phone: +7 (391) 2912272, email: ekuzmin@sfu-kras.ru.

Timokhin Nikita Aleksandrovich, Master of Engineering and Technology, radiophysics engineer, JSC Central Design Bureau Geofizika, Russia, Krasnoyarsk, 89 Akademika Kirenskogo Street, 660041, phone: +7 (999) 6402704, email: NTimokhinbox@yandex.ru.

УДК 681.5+631.544.4+551.58

Пьявченко Алексей Олегович, Саксыкова Айтана Олеговна

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ МИКРОКЛИМАТА В ТЕПЛИЦЕ

Целью настоящей работы является конкретизация задач, решаемых в процессе автоматизации тепличного хозяйства для повышения его эффективности и рентабельности при выращивании агрокультур, определение облика современной системы автоматизации микроклимата в теплице, выбор методов и средств автоматизации на основе анализа существующих технических решений.

Указано, что система автоматизации микроклимата в теплице представляет собой интегрированный комплекс технических и программных средств, предназначенных для мониторинга, анализа и управления параметрами среды выращивания растений.

В рамках работы решены такие задачи, как анализ автоматизированных процессов регулирования микроклимата в тепличном хозяйстве; обзор существующих аналогов разрабатываемой системы автоматизации; исследование и сравнительный анализ методов и средств автоматизации процессов регулирования микроклимата; разработка математических моделей объекта и процессов автоматизации; создание функциональной схемы автоматизации тепличного хозяйства с учетом заявленных в работе системотехнических требований и ограничений.

Представлены результаты создания профильной системы автоматизации первой очереди с применением среды программирования ПОЛИГОН на основе NLS-модулей производства НИЛ АП «RealLAB», что позволило экспериментально доказать реализуемость и эффективность предложенного подхода.

Теплица, схема, автоматизация, мониторинг, регулирование, микроклимат, среда программирования полигон, NLS-модуль

Pyavchenko Aleksey Olegovich, Saksykova Aitana Olegovma

ON THE ISSUE OF BUILDING AN AUTOMATION SYSTEM FOR REGULATING THE MICROCLIMATE IN A GREENHOUSE

The purpose of this work is to specify the tasks to be solved in the process of greenhouse automation in order to increase its efficiency and profitability in the cultivation of agricultural crops, to determine the appearance of a modern microclimate automation system in a greenhouse, and to select automation methods and tools based on an analysis of existing technical solutions.

It is indicated that the automation system of the microclimate in the greenhouse is an integrated set of technical and software tools designed for monitoring, analyzing and controlling the parameters of the growing environment.

Within the framework of the work, tasks such as the analysis of automated microclimate control processes in greenhouses have been solved; a review of existing analogues of the automation system being developed; research and comparative analysis of methods and tools for automating microclimate control processes; development of mathematical models of the facility and automation processes; creation of a functional scheme for greenhouse automation, taking into account the system engineering requirements and limitations stated in the work.

The results of the creation of a profile automation system of the first stage using the POLYGON programming environment based on the NLS modules produced by the Research Institute of Industrial Technology "RealLAB" are presented, which allowed experimentally proving the feasibility and effectiveness of the proposed approach.

Greenhouse, scheme, automation, monitoring, regulation, microclimate, polygon programming environment, NLS module

Введение

Современное тепличное производство является важным сегментом агропромышленного комплекса, обеспечивающим круглогодичное выращивание сельскохозяйственных культур независимо от климатических условий. Ключевым фактором обеспечения эффективности тепличного хозяйства являются процессы создания и поддержания оптимального микроклимата для растений, что невозможно без применения автоматизированных систем управления.

Автоматизация процессов управления микроклиматом в теплицах позволяет не только повысить урожайность и качество продукции, но и существенно снизить энергозатраты, оптимизировать использование ресурсов и минимизировать влияние человеческого фактора. В условиях роста цен на энергоносители и конкуренции на рынке тепличной продукции вопросы эффективной автоматизации приобретают особую актуальность.

Современные системы автоматизации микроклимата в теплице представляют собой сложные программно-аппаратные комплексы, включающие датчики, исполнительные механизмы, контроллеры, сервера автоматизации и пользовательские интерфейсы. Развитие технологий в области микроэлектроники, информационных систем и математического моделирования открывает новые возможности для совершенствования этих систем и повышения их эффективности,

Целью данной работы является обзор существующих аналогов, исследование и сравнительный анализ средств автоматизации, разработка математических моделей объекта и процессов автоматизации, создание функциональной схемы автоматизации тепличного хозяйства с учетом заявленных в работе системотехнических требований и ограничений

Основная часть

Микроклимат в теплице является ключевым фактором, влияющим на рост, развитие и продуктивность культур, поэтому его автоматизированное регулирование имеет первостепенное значение для повышения урожайности и качества продукции. Под микроклиматом теплицы понимается совокупность физических параметров воздушной и корнеобитаемой среды, оказывающих непосредственное влияние на биологические процессы растений. В таблице 1 представлены основные параметры микроклимата и их взаимодействие.

Таблица 1

Ключевые процессы в модели теплицы

Процесс	Описание	Основные параметры	Влияние на другие процессы
Теплообмен	Поступление и отдача тепла через ограждающие конструкции, от систем отопления, от солнечной радиации	Температура внутри и снаружи, коэффициенты теплопроводности, площадь поверхности	Влияет на влажность, испарение, транспирацию растений, интенсивность фотосинтеза
Влагообмен	Движение влаги в воздухе теплицы, конденсация, испарение	Влажность воздуха, температура, скорость воздуха	Влияет на температуру воздуха, развитие растений, риск заболеваний
Воздухообмен	Обмен воздуха с внешней средой и внутренняя циркуляция	Расход воздуха, положение форточек, скорость ветра	Влияет на температуру, влажность, концентрацию CO_2, равномерность микроклимата
Светопропускание	Прохождение и распределение солнечного и искусственного света	Интенсивность солнечной радиации, пропускная способность материалов, режимы досвечивания	Влияет на температуру, фотосинтез, рост растений

Данная таблица представляет ключевые процессы, которые необходимо учитывать при моделировании микроклимата в теплице. Каждый из этих процессов характеризуется своими параметрами и оказывает существенное влияние на остальные процессы, что делает систему сложной и взаимосвязанной.

Также автоматизированная система микроклиматом представляет собой интегрированный комплекс технических и программных средств, предназначенных для мониторинга, анализа и управления параметрами среды выращивания растений. На рисунке 1 представлена обобщенная блок-схема такой системы и определим основные задачи, решаемые на каждом уровне.

Система автоматизации микроклимата в теплице может быть представлена следующей иерархической структурой:

1. Уровень датчиков и исполнительных механизмов.
2. Уровень контроллеров.
3. Уровень серверов автоматизации.
4. Уровень пользовательского интерфейса.

Взаимодействие между уровнями осуществляется через различные промышленные сети и протоколы передачи данных, такие как Modbus, Profibus, CAN, Ethernet и др. Схематически это можно представить в виде иерархической пирамиды, где на нижнем уровне располагаются датчики и исполнительные механизмы, а на верхнем – пользовательские интерфейсы.

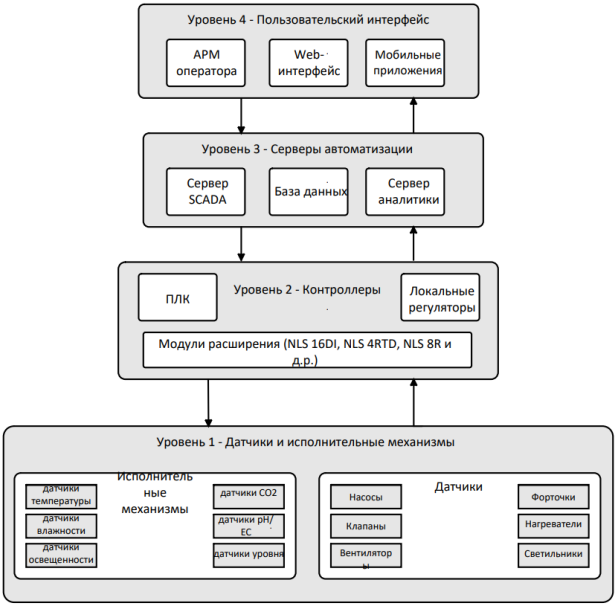


Рис. 1 Обобщенная блок-схема системы автоматизации микроклимата в теплице

Для реализации системы автоматизации микроклимата в теплице применяется распределенная архитектура на базе модулей серии NLS, объединенных по интерфейсу RS-485. Центральным элементом системы является управляющий компьютер со средой разработки "Полигон", который через преобразователь интерфейса NLS-485-USB взаимодействует с модулями ввода-вывода. Модули NLS-16DI, NLS-4RTD, NLS-8AI и NLS-8R (производство НИЛ АП RealLAB) обеспечивают сбор данных с различных типов датчиков и управление исполнительными механизмами. Структура, представленная на рисунке 2, позволяет гибко масштабировать систему и оптимально размещать оборудование в теплице, минимизируя длину кабельных трасс и повышая ее помехоустойчивость в целом.

В качестве реализации математической модели параметров микроклимата были использованы формулы интеграла свертки (Интеграл Дюмеля), метод детерминированных предметов через определения переходного свойства при ступенчатых изменениях управления на входе. Преобразовав через упрощения и преобразования Лапласа, были получены формулы передаточной функции. И после, опытным путем была рассчитана экспериментальная кривая изменения влажности и экспериментальная кривая изменения температуры, и аппроксимировав заданные графики передаточной характеристикой 1-го

порядка было выявлено, что ошибка аппроксимации измерения температуры составляет 0,5 % , а ошибка аппроксимации влажности – 1,2 %



Рис. 2 Структурная схема системы автоматизации микроклимата на базе модулей NLS

Система автоматизации микроклимата на базе модулей NLS представляет собой распределенную структуру с центральным управляющим компьютером и набором модулей ввода-вывода, соединенных по интерфейсу RS-485, и ПЛК NLScon-RSB-S. Основу системы составляют четыре ключевых модуля: NLS-16DI (для дискретных сигналов), NLS-4RTD (для термодатчиков), NLS-8AI (для аналоговых датчиков) и NLS-8R (для управления исполнительными механизмами). Взаимодействие осуществляется по протоколу Modbus RTU, что обеспечивает надежную работу по интерфейсу RS-485 на расстояниях до 1200 метров. Благодаря использованию управляющего компьютера с предустановленной средой разработки SCADA Полигон совместно с перечисленными выше модулями ввода/вывода, удалось построить упрощенный прототип автоматизированной системы требуемого назначения, что позволило проверить на практике работоспособность предложенного подхода.

Вывод

В ходе проведенного исследования были: выполнен анализ методов автоматизации микроклимата в теплице, выполнен обзор ключевых процессов микроклимата в модели теплицы, проведен анализ обобщённой блок-схемы систем автоматизации микроклимата в теплице и реализован прототип автоматизированной системы в среде разработки SCADA Полигон.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гиш Р.А., Карпенко Е.Н. — Модернизация и совершенствование управления параметрами микроклимата — основа теплиц V поколения. Научный журнал КубГАУ, 2016, №123.
2. Водянников В.Т., Лысенко Е.Г., Худякова Е.В., Лысюк А.И. — Разработка системы мониторинга и обработки климатических параметров в тепличных хозяйствах. 2-е изд., СПб.: Лань, 2015
3. Гамалеева Е.И., Гамалеев Д.О. — Моделирование системы управления микроклиматом в малой крышной теплице. Студенческий научный форум, 2023.
4. Дабылова Н.С., Чакеева К.С. — Обзор по микроклимату и применению теплиц: параметры проектирования, тепловое моделирование и технологии управления климатом. Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами, 2022, №2(14).
5. Розенберг, В. С., Курилин, Ю. В. Применение автоматизированных систем управления микроклиматом в тепличных хозяйствах // Инновации и технологии. – 2021. – № 3. – С. 44–52.
6. Куцевич, И. И., Борисов, М. А. Моделирование и оптимизация микроклимата в теплицах с использованием автоматизированных систем управления // Аграрные технологии и наука. – 2022. – Т. 12, № 4. – С. 113–120.
7. Давыдов, А. В. Применение датчиков для мониторинга микроклимата в теплицах // Энергосбережение и экология. – 2021. – № 7. – С. 73–80.

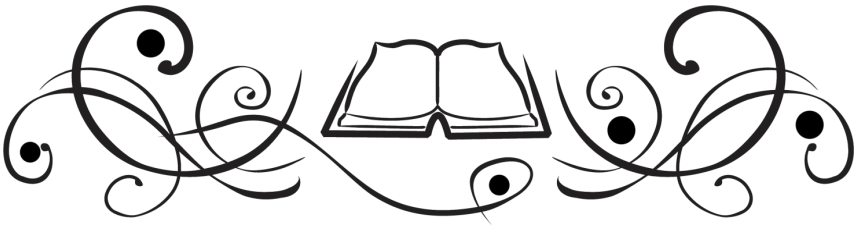
Саксыкова Айтана Олеговна, студент группы КТсо5-1 Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, телефон: +7 (9615)44-96-44, email:saksykova@sfedu.ru.

Пьявченко Алексей Олегович, к.т.н., доцент кафедры вычислительной техники ИКТИБ ЮФУ, Россия, город Таганрог, телефон: +78634371656; email:aopyavchenko@sfedu.ru/

Saksykova Aitana Olegovna, student of the KTso5-1 group of the Southern Federal University, Taganrog, Russia, phone: +7 (9615)44-96-44, email: saksykova@sfedu.ru .

Pyavchenko Aleksey Olegovich, Southern Federal University; e-mail: aop61@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371656; the department of computer engineering; cand. of tech. sc.; associate professor.

Секция
Системы связи и навигации, авиационные системы и технологии



УДК 621.371

Косак Роман Эдуардович

КОМПАКТНЫЕ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ВИВАЛЬДИ

В статье представлены конструкции компактных антенн на основе ранее разработанных излучателей Вивальди и приведены их характеристик излучения: коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), коэффициент усиления (КУ) и уровень кросс-поляризации. Характеристики излучения получены в широкой (ШП) и сверхширокой полосе (СШП) частот.

Целью работы являлись анализ и сравнение характеристик излучения разработанных конструкций антенн на основе излучателей Вивальди. Определено, что антенны Вивальди с прямоугольными и эллиптическими вставками, а также синусоидальным рифлением имеют лучшее согласование по сравнению с исходной широкополосной конструкцией. Предложенные конструкции антенн являются компактными при работе в диапазоне частот до 1 ГГц, а антенна с синусоидальным рифлением в этом же диапазоне является СШП.

Антенна Вивальди, излучатель фазированной антенной решетки, коэффициент стоячей волны по напряжению, коэффициент усиления, сверхширокая полоса частот, уровень кросс-поляризации, широкая полоса частот.

Kosak Roman Eduardovich

COMPACT ANTENNAS BASED ON VIVALDI RADIATORS

The article presents the designs of compact antennas based on previously developed Vivaldi radiators and provides an analysis of their radiation characteristics: voltage standing wave ratio (VSWR), realized gain (RG) and cross-polarization level. The radiation characteristics are obtained in wide and ultra-wide band (UWB) frequencies.

Radiation characteristics research and comparison of the developed antennas based on Vivaldi radiators were the purpose of this work. Clarified, that Vivaldi antennas with rectangular and elliptical inserts, as well as sinusoidal corrugation, have better matching compared to the based broadband design. The proposed antenna designs are compact when operating in the frequency range up to 1 GHz, and the antenna with sinusoidal corrugation in the same range is UWB.

Vivaldi antenna, phased array radiator, voltage standing wave ratio, realized gain, ultra-wide bandwidth, cross-polarization level, wide bandwidth.

Введение

В последнее время наблюдается постоянно растущая потребность в уменьшении массогабаритных параметров, а также увеличении ширины рабочей полосы частот для военных, научных и коммерческих приложений вследствие ряда достоинств ШП и СШП сигналов. Такие сигналы переносят большее количество информации по сравнению с узкополосными сигналами и обладают высокой разрешающей способностью. Они позволяют обеспечить высокую помехозащищенность ШП систем связи и организовать одновременную работу многих абонентов в общей полосе частот асинхронно-адресной системы связи с кодовым разделением абонентов. К тому же, СШП сигнал имеет за счет своей сверхширокой полосы малое затухание при распространении в различных средах [1].

Существует несколько определений ШП и СШП. В данной работе ШП будет считаться антенна с коэффициентом перекрытия (КП, отношение верхней рабочей частоты к нижней) $1 < КП < 2$ по уровню КСВН ≤ 3, а СШП – антенна, у которой $КП \geq 2$ по тому же уровню [2]. При этом, компактные антенны позволяют снизить вес и размер итогового радиотехнического устройства, что позволит уменьшить затраты на его изготовление, а также упростить транспортировку [3]. В данной статье компактными будут считаться антенны с электрической высотой менее длины волны λ на верхней рабочей частоте.

На данный момент распространенными являются антенны Вивальди [4] благодаря целому ряду их преимуществ, таких как возможность работы в ШП и СШП и обеспечение компактности конструкции, планарность, возможность создания антенн линейной и круговой поляризации. Более того, такие антенны могут использоваться в качестве излучателей фазированных антенных решеток [5–7]. Именно форма антенны Вивальди в основном определяет ее характеристики излучения.

Целью работы являлись анализ и сравнение характеристик излучения разработанных конструкций антенн на основе излучателей Вивальди фазированных антенных решеток.

Основная часть

1. Исходная конструкция компактной антенны Вивальди и ее характеристики излучения

Исходная конструкция антенны Вивальди, представленная на рис. 1, основана на ранее разработанной конструкции излучателя [6]. В качестве диэлектрической подложки использован тот же материал Rogers RT/duroid 5880 с относительной диэлектрической проницаемостью 2,2 и размером 0,5 мм × 120,0 мм × 185 мм. Питается антенна коаксиальным кабелем. На рис. 2 представлены ее характеристики излучения – КСВН, КУ и уровень кроссовой поляризации.

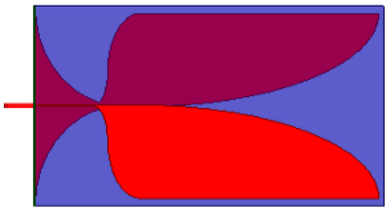


Рис. 1 – Исходная конструкция антенны Вивальди

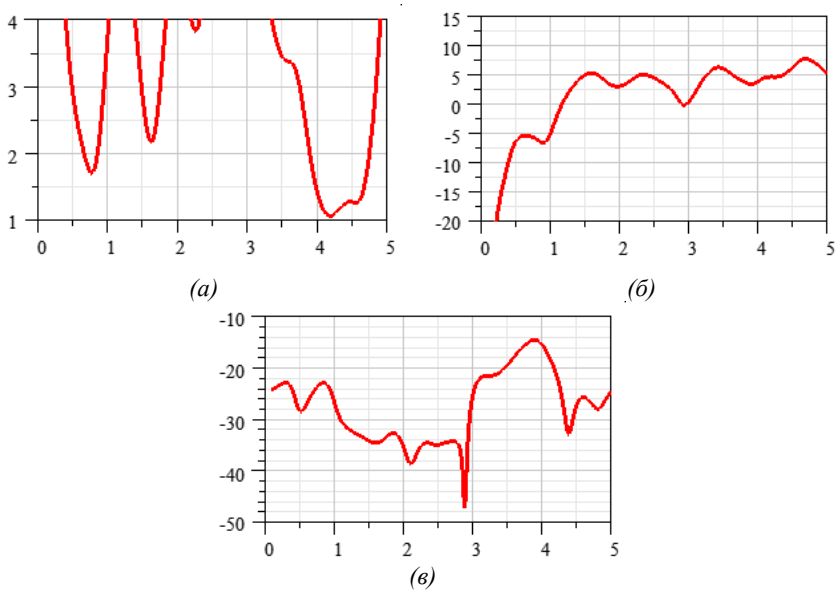


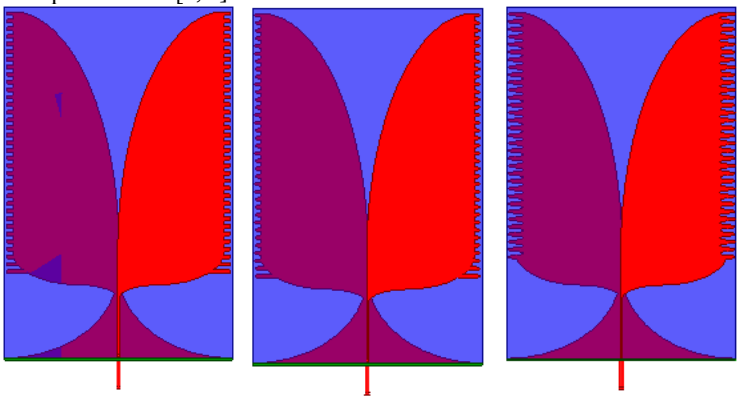
Рис. 2 – КСВН (а), КУ (б) и уровень кроссовой поляризации (в) исходной конструкции антенны Вивальди

Согласно рис. 2,а, рабочая полоса частот (РПЧ) антенны по уровню КСВН ≤ 3 находится в диапазоне от 0,49 до 0,95 ГГц и от 3,75 до 4,84 ГГц, чему соответствуют КП ~ 1,939 и 1,291. Значение КУ находится в пределах от -6,7 до -5,1 дБ и от 3,3 до 7,9 дБ для нижней и верхней РПЧ, соответственно, что следует из рис. 2,б. Из рис. 2,в видно, что значение уровня кроссовой поляризации не превышает значения -22 и -14 дБ для нижней и верхней РПЧ, соответственно. Отсюда следует, что эта антенна имеет линейную поляризацию. При этом, электрическая высота антенны на верхней рабочей частоте нижней РПЧ 0,954 ГГц составляет 0,588 λ, а на верхней рабочей частоте верхней РПЧ 4,84 ГГц – 2,985 λ. Таким образом, исходная конструкция

широкополосной антенны Вивальди является компактной только в нижней РПЧ от 0,495 до 0,954 ГГц.

2. Модифицированные конструкции компактных антенн Вивальди и их характеристики излучения

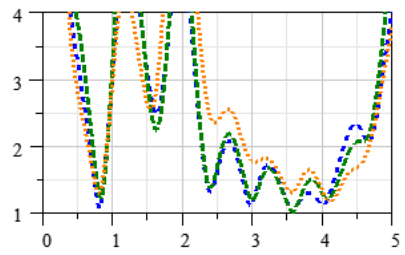
Как видно из представленных характеристик излучения, предложенная исходная конструкция антенны Вивальди не соответствует одновременно критериям СШП и компактности. В качестве способов ее модификации рассмотрено использование прямоугольных и эллиптических вставок на кромке, а также использование синусоидального рифления на кромке, что представлено на рис. 3,а,б,в, соответственно. Конструкции приведенных антенн основаны на соответствующих конструкциях излучателей фазированных антенных решеток из [6, 7].



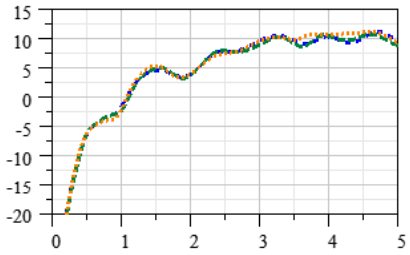
(а) *(б)* *(в)*

Рис. 3 – Антенны Вивальди с прямоугольными (а), эллиптическими (б) вставками на кромке, а также с синусоидальным рифлением (в)

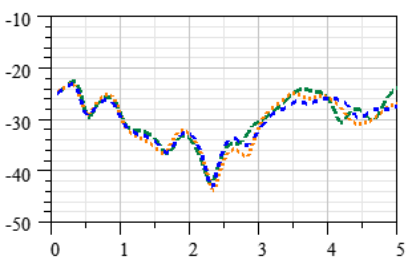
На рис. 4,а,б,в представлены характеристики излучения приведенных модифицированных антенн – КСВН, КУ и уровень кроссовой поляризации – с прямоугольными (---), эллиптическими (– –) вставками и синусоидальным рифлением (···), соответственно.



(а)



(б)



(в)

Рис. 4 – КСВН (а), КУ (б) и уровень кроссовой поляризации (в) антенны Вивальди с прямоугольными (---), эллиптическими (– –) вставками на кромке, а также с синусоидальным рифлением ( )

Результаты исследования представленных характеристик излучения приведенных модифицированных антенн сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Численные параметры характеристик излучения модифицированных антенн

	Нижняя РПЧ по уровню КСВН ≤ 3	КП ниж-ней РПЧ	Верхняя РПЧ по уровню КСВН ≤ 3	КП верх-ней РПЧ	КУ в нижней РПЧ	КУ в верхней РПЧ	Уровень кросс-поляризации для обеих РПЧ
Антенна с прямоугольными вставками	От 0,54 до 1,00 ГГц	1,851	От 2,19 до 4,85 ГГц	2,215	От -5,7 до -1,6 дБ	От 4,8 до 11,3 дБ	-25 дБ
Антенна с эллиптическими вставками	От 0,61 до 0,99 ГГц	1,623	От 2,20 до 4,80 ГГц	2,182	От -4,8 до -2,4 дБ	От 4,6 до 10,8 дБ	-24 дБ
Антенна с синусоидальным рифлением	От 0,48 до1,01 ГГц	2,104	От 2,31 до 4,86 ГГц	2,104	От -6,4 до -2,2 дБ	От 2,2 до 11,3 дБ	-24 дБ

Как видно из представленных характеристик излучения и таблицы 1, предложенные конструкции с прямоугольными и эллиптическими вставками соответствуют критерию СШП только в верхней РПЧ. При этом, компактными и широкополосными они являются только в нижней РПЧ. Электрическая высота антенны с прямоугольными вставками на частоте 1,00 ГГц составляет 0,617 λ, антенны с эллиптическими вставками на частоте 0,99 ГГц – 0,610 λ.

Конструкция с синусоидальным рифлением является компактной и сверхширокополосной в нижней РПЧ, а также сверхширокополосной в верхней РПЧ. Электрическая высота этой антенны на частоте 1,01 ГГц составляет 0,623 λ. Модифицированные антенны имеют лучший средний уровень

согласования в диапазоне частот до 1 ГГц по сравнению с исходной конструкцией.

Выводы

Исходная конструкция антенны Вивальди является компактной и широкополосной в диапазоне частот до 1 ГГц. Антенны с прямоугольными и эллиптическими вставками имеют лучшее согласование, а также являются компактными и широкополосными в РПЧ до 1 ГГц. В то же время, в верхней РПЧ они являются СШП. Антенна с синусоидальным рифлением является СШП как в нижней, так и в верхней РПЧ, при этом в диапазоне частот до 1,01 ГГц она также является компактной.

Работа выполнена в Центре коллективного пользования «Прикладная электродинамика и антенные измерения» Южного федерального университета в г. Таганрог.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Попов В. Ф.* Широкополосные и сверхширокополосные сигналы в системах мобильной связи и навигации: учеб. пособие / Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 204 с.

2. *Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И.* Устройства СВЧ и антенны. – 2 изд. – Москва: Радиотехника, 2006. – 376 с.

3. Патент № 2824863 Российская Федерация, МПК H 01 Q 1/38. Сверхширокополосная антенна Вивальди кардиоидной формы: № 2024110344: заявл. 16.04.2024: опубл. 14.08.2024 Бюл. 23 / *Косак Р.Э.* – 8 с.

4. *P. Gibson*, "The Vivaldi aerial," in *Proc. 9th Eur. Microw. Conf.*, vol. 1, 1979, pp. 101-105.

5. *Зырянов Ю. Т., Федюнин П. А., Белоусов О. А. [и др.]* Антенны: учебное пособие для вузов — 5-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 412 с.

6. *R. E. Kosak and A. V. Gevorkyan*, "Research of Ways to Improve Radiation Characteristics of Phased Array Radiator Based on Vivaldi Antenna," 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 2021, pp. 211-214.

7. *Косак, Р. Э.* Влияние синусоидального рифления кромки излучателя Вивальди на характеристики излучения // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех-2023): Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко в двух томах. Том 2. – Таганрог: Южный федеральный университет, 2023. – с. 124-129.

Автор: Косак Роман Эдуардович, аспирант, заведующий лабораторией кафедры АиРПУ ИРТСУ ЮФУ, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347922, телефон: +7 (8634) 37-17-33, email: kosak@sfedu.ru.

Author: Kosak Roman Eduardovich, postgraduate student, head of the laboratory of the Department of Antennas and Radiotransmitting Devices IRESC SFU, Russia, Taganrog, Nekrasovsky lane, 44, 347922, phone: +7 (8634) 37-17-33, email: kosak@sfedu.ru.

УДК 534.21

Бугаев Сергей Александрович, Гайно Евгений Владимирович, Пивнев Петр Петрович, Цветков Федор Алексеевич, Дикарева Елена Вячеславовна, Грицаенко Павел Григорьевич

ПОДВОДНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ МАЯК КАК АВАРИЙНОЕ РЕГИСТРИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ВОЗДУШНОГО СУДНА

В работе описан принцип работы подводного акустического маяка (ПАМ), предназначенного для обозначения местонахождения воздушного судна при нахождении его в морской или пресной воде (в случае его затопления), путем подачи аварийных акустических сигналов с целью последующей пеленгации ультразвуковых импульсов гидроакустическим комплексом.

Приведены результаты лабораторных испытаний макетов ПАМ в гидроакустическом бассейне, входящем в уникальный объект научной инфраструктуры «Имитационно-натурный гидроакустический комплекс» (УНУ «ИНГАК»), а также расчет и выбор автономных источников питания для ПАМ.

Подводный акустический маяк, акустические ультразвуковые сигналы, пьезоакустический элемент, автономный источник питания.

Bugaev Sergey Aleksandrovich, Gayno Evgeny Vladimirovich, Pivnev Peter Petrovich, Tsvetkov Fyodor Alekseevich, Elena Dikareva Vyacheslavovna, Gritsayenko Pavel Grigoryevich

UNDERWATER ACOUSTIC BEACON AS AN EMERGENCY RECORDING DEVICE FOR AIRCRAFTS

The paper describes the principle of operation of the underwater acoustic beacon (UAB) designed to mark the location of an aircraft when it is in sea or fresh water (in case of its flooding) by sending emergency acoustic signals for the purpose of subsequent direction finding of ultrasonic impulses by a hydroacoustic complex.

The results of laboratory tests of UAB mock-ups in the hydroacoustic pool, which is a part of the unique scientific infrastructure object «Simulation-natural hydroacoustic complex» (UNU «INGAC»), as well as the calculation and selection of autonomous power supplies for UAB are presented.

Underwater acoustic beacon, acoustic ultrasonic signals, piezoacoustic element, autonomous power supply.

Принцип действия ПАМ

ПАМ на воздушном судне находится в дежурном режиме. Электроснабжение от автономных источников питания отсутствует. В случае попадания объекта в воду производится автоматическое замыкание включающего устройства (электрический замыкатель) ПАМ.

Цифровой формирователь сигнала генерирует последовательности сигналов с заданной длительностью, периодом следования и частотой. Затем

сигнал усиливается и через согласующую цепь поступает на пьезоакустический элемент, в котором происходит преобразование электрического сигнала в ультразвуковой. Ультразвуковое излучение ПАМ поступает в окружающую водную среду.

На рисунке 1 представлена структурная схема ПАМ.

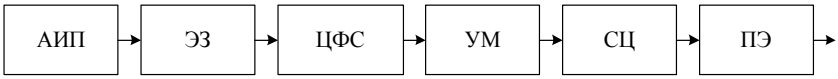


Рис. 1 Структурная схема ПАМ
АИП – автономный источник питания, ЭЗ – электрический замыкатель, ЦФС – цифровой формирователь сигнала, УМ – усилитель мощности, СЦ – согласующая цепь, ПЭ – пьезоакустический элемент

В рамках проводимых исследований были разработаны и изготовлены два варианта макетов ПАМ с различными частотами излучения импульса звукового давления для установки на воздушном судне в качестве аварийного регистрирующего устройства: 1-й вариант – 8,8 кГц и 2-й вариант – 37,5 кГц (далее ПАМ-8 и ПАМ-37).

Корпуса ПАМ-8 и ПАМ-37 выполнены из титанового сплава, обеспечивающего работу ПАМ на глубинах до 6000 м.

Внешний вид ПАМ-8 и ПАМ-37 представлен на рисунке 2.



а) б)

Рис. 2 Внешний вид подводных акустических маяков: а) ПАМ-8, б) ПАМ-37

Для проверки технических характеристик макетов ПАМ-8 и ПАМ-37 были проведены лабораторные исследования в гидроакустическом бассейне УНУ «ИНГАК»:

- измерены характеристики направленности (ХН) излучаемых сигналов в плоскости оси симметрии и в плоскости, перпендикулярной оси симметрии;
- измерены максимальные уровни звукового давления на расстоянии 1 м.

ХН ПАМ-8 и ПАМ-37 в плоскости оси симметрии приведены на рисунках 3 и 5, в плоскости, перпендикулярной оси симметрии – на рисунках 4 и 6.

Проведенные в гидроакустическом бассейне УНУ «ИНГАК» испытания показали:

- неравномерность ХН в плоскости оси симметрии ПАМ-8 не превышает 8 дБ, ПАМ-37 – 10 дБ), неравномерность ХН в плоскости, перпендикулярной оси симметрии ПАМ-8 не превышает ±1,5 дБ, ПАМ-37 – ±1 дБ;

- измеренные максимальные уровни звукового давления составляют: для ПАМ-8 – 30 Па, для ПАМ-37 – 50 Па.

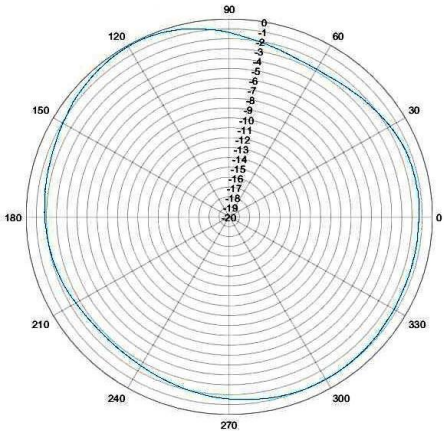


Рис.3 ХН ПАМ-8 в плоскости оси симметрии

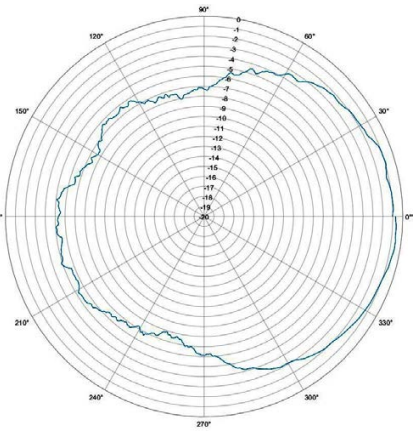


Рис.4 ХН ПАМ-8 в плоскости, перпендикулярной оси симметрии

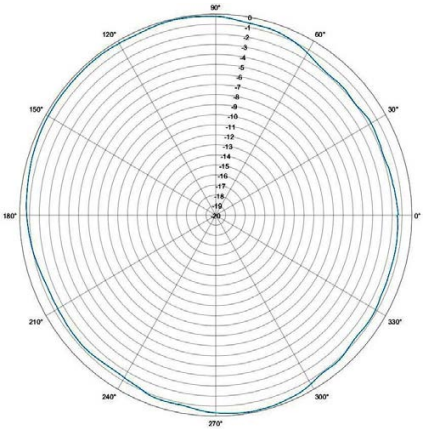


Рис. 5 ХН ПАМ-37 в плоскости оси симметрии

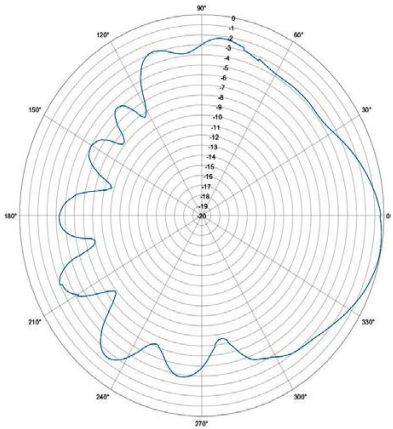


Рис. 6 ХН ПАМ-37 в плоскости, перпендикулярной оси симметрии

Автономные источники питания для ПАМ-8 и ПАМ-37

Одним из важных направлений при разработке ПАМ являются расчет и выбор источника питания.

При расчете были заданы следующие характеристики ПАМ:

- время работы ПАМ в дежурном режиме – не менее 5 лет; в рабочем режиме – не менее 90 суток;

- импульсный ток при выработке импульса излучения: ПАМ-8 – 1000 мА; ПАМ-37 – 100 мА;

- диапазон рабочих температур – от минус 4ºС до плюс 40ºС;

- длительность излучаемого импульса звукового давления: $T_{И8}$ = 10,0 мс для ПАМ-8, $T_{И37}$ = 10,0 мс для ПАМ-37;

- период повторения импульса звукового давления – $T_{П8}$ = 10,0 сек, $T_{П37}$ = 1,0 сек.

Для выбора источника питания вначале необходимо оценить энергопотребление ПАМ, при этом нужно учитывать два режима его работы: дежурный и рабочий.

Расчет энергопотребления ПАМ в дежурном режиме

В дежурном режиме ПАМ должен потреблять минимальный ток, чтобы обеспечить максимальное время работы в дежурном режиме $T_{ДЕЖ}$ не менее 5 лет (43800 часов).

Ток потребления $I_{ПОТ}$ макетов ПАМ в дежурном режиме не превышает 10 мкА. Тогда минимальная емкость источника питания $Q_{ДЕЖ}$ для дежурного режима составляет

$$Q_{ДЕЖ} = I_{ПОТ} \cdot T_{ДЕЖ} = 10^{-5} \cdot 43800 = 0{,}438\ \text{А} \cdot \text{ч},$$

где $I_{ПОТ}$ в амперах; $T_{ДЕЖ}$ в часах.

Расчет энергопотребления ПАМ в рабочем режиме

Определим скважность импульсов излучения q и найдем емкость источника питания в рабочем режиме и общую требуемую емкость:

$$q_8 = T_{П8} / T_{И8} = 10{,}0 / 0{,}010 = 1000.$$

$$q_{37} = T_{П37} / T_{И37} = 1{,}0 / 0{,}010 = 100.$$

Средний ток ПАМ $I_{СР}$ в рабочем режиме может быть рассчитан по формуле

$$I_{СР} = I_{И} / q,$$

где $I_{И}$ – ток потребления в момент излучения импульса.

Тогда средний ток потребления

$$I_{СР8} = 1{,}0 / 1000 = 0{,}001\ \text{А};$$

$$I_{СР37} = 0{,}1 / 100 = 0{,}001\ \text{А}.$$

Требуемая емкость источника питания в рабочем режиме $Q_{Р}$ за время $T_{Р}$ = 90 дней (2160 ч) может быть рассчитана по формуле

$$Q_{Р8} = I_{СР8} \cdot T_{Р} = 10^{-3} \cdot 2160 = 2{,}16\ \text{А} \cdot \text{ч};$$

$$Q_{Р37} = I_{СР37} \cdot T_Р = 10^{-3} \cdot 2160 = 2{,}16\ А \cdot ч.$$

Отсюда общая требуемая минимальная емкость источника питания составит:

$$Q_8 = Q_{ДЕЖ} + Q_{Р8} = 0{,}438 + 2{,}16 = 2{,}598\ А \cdot ч;$$

$$Q_{37} = Q_{ДЕЖ} + Q_{Р37} = 0{,}438 + 2{,}16 = 2{,}598\ А \cdot ч.$$

На основании приведенных расчетов, возможно применить в качестве автономного источника питания [1] литиевую батарею LSH 20, тип ER34615M, 3.6 V 13000 mAh для ПАМ-8 и литиевую батарею «Forte», тип CR26500, 3.0 V 5400 mAh для ПАМ-37.

ВЫВОДЫ

В рамках выполненной инициативной работы разработаны и изготовлены макеты ПАМ с рабочими частотами 8,8 кГц и 37,5 кГц. Результаты лабораторных испытаний макетов показали перспективность данных исследований. Неравномерность ХН ПАМ не превышает 10 дБ. Уровни акустического давления достаточны для обнаружения ПАМ на больших расстояниях. Выполненные расчеты и обоснование выбора источников питания позволяют сделать вывод о том, что их использование в ПАМ-8 и ПАМ-37 может обеспечить стабильное излучение сигналов на протяжении длительного времени (в течение нескольких месяцев).

В настоящий момент продолжаются работы в этом направлении по улучшению характеристик акустических маяков. Идет проработка конструкции корпуса, излучателя и усилителя мощности для получения меньшей неравномерности ХН и увеличения уровня излучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Литий-ионные аккумуляторы /А.В. Садовников, В.В. Макарчук// Молодой ученый. – 2016. – № 23 (127). – С. 84-89. – URL: https://moluch.ru/archive/127/35051/.

Авторы:

Бугаев Сергей Александрович, заместитель директора Научно-конструкторского бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета, Россия, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, 347922, телефон: +7(8634) 39-30-75, e-mail: sabugaev@sfedu.ru

Гайно Евгений Владимирович, учебный мастер 1 категории, заведующий лабораторией кафедры Теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347922, телефон: +7(8634) 37-16-32, e-mail: evgayno@sfedu.ru

Пивнев Петр Петрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального

университета, Россия, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, 347922, телефон: +7(8634) 37-17-95, e-mail: pivnevpp@sfedu.ru

Цветков Федор Алексеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Южного федерального университета, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347922, телефон: +7(8634) 37-16-32, e-mail: facvetkov@sfedu.ru

Дикарева Елена Вячеславовна, начальник сектора Научно-конструкторского бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета, Россия, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, 347922, телефон: +7(8634) 39-30-75, e-mail: edikareva@sfedu.ru.

Грицаенко Павел Григорьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный специалист Научно-конструкторского бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета, Россия, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, 347922, телефон: +7(8634)39-30-75, e-mail: pgricaenko@sfedu.ru.

Authors:

Bugaev Sergey Alexandrovich, Deputy Director of the Scientific Design Bureau of Digital Signal Processing of the Southern Federal University, 2 Shevchenko str., Taganrog, 347922, Russia; phone: +7(8634) 39-30-75, email: sabugaev@sfedu.ru

Gaino Evgeny Vladimirovich, educational master of the 1st category, Head of the laboratory of the Department of Theoretical Fundamentals of Radio Engineering, Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, 44 Nekrasovsky per. 44, Taganrog, 347922, Russia; phone: +7(8634) 37-16-32, e-mail: evgayno@sfedu.ru.

Pivnev Petr Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electrohydroacoustic and Medical Equipment, Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrument Engineering of the Southern Federal University, 2 Shevchenko str.2, Taganrog, 347922, Russia; phone: +7(8634) 37-17-95, e-mail: pivnevpp@sfedu.ru.

Tsvetkov Fedor Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the Southern Federal University, 44 Nekrasovsky per. 44, Taganrog, 347922, Russia; phone: +7(8634) 37-16-32, e-mail: facvetkov@sfedu.ru

Dikareva Elena Vyacheslavovna, Head of Sector of the Scientific Design Bureau of Digital Signal Processing of the Southern Federal University, 2 Shevchenko st., Taganrog, 347922, Russia; phone: +7(8634) 39-30-75, e-mail: edikareva@sfedu.ru.

Gritsayenko Pavel Grigorievich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Chief Specialist of the Scientific Design Bureau of Digital Signal Processing of the Southern Federal University, 2 Shevchenko st., Taganrog, 347922, Russia; phone: +7(8634) 39-30-75, e-mail: pgricaenko@sfedu.ru.

УДК 629.735.015

Асовский Валерий Павлович, Кузьменко Алла Сергеевна,
Асовский Алексей Валериевич

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СНОСА ПРИ ОПРЫСКИВАНИИ БЕСПИЛОТНЫМИ ВОЗДУШНЫМИ СУДАМИ

Показана актуальность и проблемы оценки сноса при опрыскивании сельскохозяйственных угодий с применением беспилотных воздушных судов, предложен сформированный программный пакет численного моделирования процессов и показателей защитного опрыскивания беспилотными воздушными судами вертолетного типа, представлены отдельные результаты оценки различных показателей сноса препаратов при защитном опрыскивании гексакоптером типа DJI Agras T20 в ожидаемых условиях выполнения авиационных работ, сделаны выводы по влиянию на показатели сноса значимых факторов проведения обработок сельскохозяйственных культур и рекомендации по использованию результатов.

Ключевые слова: *беспилотное воздушное судно (БВС), опрыскивание, снос капель, численное моделирование, показатели сноса*

Asovsky Valery Pavlovich, Kuzmenko Alla Sergeevna,
Asovsky Alexey Valeryevich

NUMERICAL SIMULATION OF DRIFT PERFORMANCE IN SPRAYING WITH UNMANNED AIRCRAFT

The article shows the relevance and problems of assessing demolition when spraying agricultural land using unmanned aircraft. A developed software package for numerical modeling of processes and indicators of protective spraying by helicopter-type unmanned aircraft is proposed. Separate results of evaluation of various indicators of drug demolition during protective spraying with a DJI Agras T20 hexacopter in the expected conditions of aviation operations are presented. Conclusions on the impact of significant factors of agricultural crop treatments on the indicators of drift drops and recommendations on the use of the results were presented.

Keywords: *unmanned aircraft (UAV), spraying, droplet drift, numerical simulation, indicators of drift*

Введение

Развитие беспилотных систем и технологий является неотъемлемым и значимым инновационным элементом современного этапа научно-технического развития и технологического уклада. Одним из наиболее перспективных гражданских направлений такого развития в настоящее время во всем мире считается применение беспилотных воздушных судов (БВС) в интересах

агропромышленного комплекса, где по разным оценкам может быть задействовано до 80-90 % всех коммерческих БВС, при этом значительная их часть (до 30 - 40 %) будет использована для внесения пестицидов и агрохимикатов ([1-4 и др.]). Характерно, что при всем многообразии видов и классов БВС наиболее перспективными для авиационного внесения указанных препаратов в сельском хозяйстве общепринято являются БВС вертолётного (мультироторного) типа – мультикоптеры ([4-6 и др.]).

Несмотря на значительный интерес к использованию БВС для выполнения авиационно-химических работ (АХР) по внесению пестицидов и агрохимикатов и большое количество проведенных у нас в стране и за рубежом экспериментальных работ различных аспектов таких работ до настоящего времени имеется ряд вопросов, без решения которых внедрение БВС для массового производства АХР практически невозможно. Одним из таких вопросов является проблема сноса рабочих жидкостей, прежде всего гербицидов и инсектицидов. Снос как явление неуправляемого переноса внесенных при обработке рабочих жидкостей за пределы обрабатываемого участка является важной и значимой проблемой обеспечения эффективности и экологической безопасности процессов химизации сельского и лесного хозяйства вне зависимости от метода и средств внесения препаратов ([1-3 и др.]). К сожалению, до настоящего времени, не смотря на множество проведенных исследований, проблема сноса в целом и для БВС в частности реально не решена ни в части накопления объективных знаний по ней, ни в части надежных методов исследования сноса, ни в части его практического нормирования ([6-9 и др.]).

В этой связи, в рамках настоящей работы, были проведены расчетно-теоретические и экспериментальные исследования с целью оценки процессов, особенностей и показателей сноса рабочей жидкости при опрыскивании БВС полевых сельскохозяйственных культур, отдельные результаты которых представлены ниже.

Основная часть

Расчетно-теоретические исследования проводились на базе сформированных ранее в среде программирования *DELPHI* с использованием подходов [10] прикладных программных средств численного моделирования процессов и показателей защитного опрыскивания БВС (мультикоптерами) в сельскохозяйственном производстве. Общая структура, описание и результаты оценки адекватности и достоверности результатов использования программного пакета представлены в более ранних работах, в частности, в [11].

На рис. 1 для примера использования модернизированного программного пакета в полулогарифмической системе координат показаны распределения в волне осаждения плотности покрытия каплями (Nк), удельного осадка рабочей жидкости (Qg) и действующего вещества (Pg), а также среднеарифметического диаметра (САД) капель при выполнении гексакоптером DJI Agras T20 обработки полевых культур с нормой внесения рабочей жидкости (водный 10 % раствор «среднего» пестицида ([10])) 10 л/га (по пестициду – 1 л/га (0,1 мл/м^2)) на скорости 5 м/с и

высоте 5 м при ширине захвата 6 м (используются 4 штатные форсунки типа TeeJet XR110-01 с общим выпуском жидкости 1,8 л/мин. (30 мл/с) с ее диспергированием, соответствующем медианно-объемному диаметру (МОД) 190 мкм) в утреннее время (7.00) летнего периода при небольшой облачности (2 балла) и боковом ветре 2 м/с (слабая неустойчивость, категория С).

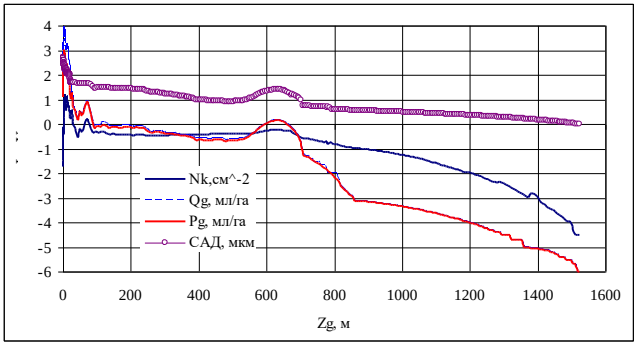


Рис. 1 Распределение показателей осаждения рабочей жидкости при выполнении гексакоптером DJI Agras T20 опрыскивания с нормой 10 л/га на скорости 5 м/с и высоте 5 м в условиях слабой неустойчивости и ветре 2 м/с

Из представленных данных, в частности, можно отметить следующие:

- максимальные величины отмеченных выше показателей имеют место в зоне непосредственного пролета БВС на поперечном удалении от линии пролета (Zg) в пределах 30 м с последующей общей тенденцией их уменьшения по мере сноса капель рабочей жидкости (роста Zg);

- характер выпадения осадка рабочей жидкости по мере удаления от линии пролета БВС не является монотонным и отличается наличием локальных экстремумов показателей выпавших при сносе капель, что отличается от упрощенных моделей сноса загрязняющих веществ на базе случайного гауссовского процесса;

- примерно с удалений 200 м показатели объемов рабочей жидкости и препарата «сходятся», что указывает на практически полное испарение растворителя (воды) и дальнейшее осаждение мелкодисперсных капель, состоящих в основном из действующего вещества;

- предельная дальность сноса рабочей жидкости для рассмотренного варианта опрыскивания БВС составляет около 1540 м и достигается единичными каплями размерностью несколько микрометров с исчезающе малым количеством осадка (расчетные плотность покрытия и удельный объем осадка на уровне соответственно 10^{-4} – 10^{-5} шт./см^2 и 10^{-6} мл/га).

С целью оценки влияния на предельные дальности сноса рабочей жидкости отдельных факторов в табл. 1 представлены полученные с использованием программного пакета предельные дальности сноса при выполнении гексакоптером DJI Agras T20 опрыскивания с нормой 10 л/га для разных параметров полета и скорости бокового ветра для отмеченного выше состояния приземного слоя атмосферы (жирным шрифтом выделены максимальные для варианта значения).

Таблица 1

Расчетные предельные дальности сноса
при выполнении гексакоптером DJI Agras T20 опрыскивания с нормой 10 л/га
при разных параметрах полета и скорости бокового ветра, м

№№ п.п.	Скорость, м/с	Высота, м	Ветер, м/с	Форсунки опрыскивателя				Волна в целом
				№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	
1	5	5	2	**1536**	1311	1242	1452	**1536**
2	5	3	2	536	563	547	**775**	**775**
3	5	1,5	2	756	**1975**	835	1148	**1975**
4	3	5	2	**1305**	1190	1182	1184	**1305**
5	3	3	2	522	517	**1016**	950	**1016**
6	3	1,5	2	1566	**1685**	413	356	**1685**
7	7	5	2	1111	1381	**1630**	1558	**1630**
8	7	3	2	884	1062	**1298**	737	**1298**
9	7	1,5	2	**870**	599	234	469	**870**
10	5	3	4	2502	2600	2715	**2958**	**2958**
11	3	3	4	1385	**1667**	1405	1119	**1667**
12	7	3	4	2723	2764	2918	**4418**	**4418**
13	5	3	3	1889	1288	2047	**2602**	**2602**
14	5	3	1	-	379	263	**379**	**379**

Как видно из представленных данных при опрыскивании гексакоптером DJI Agras T20 полевых культур в условиях бокового ветра в диапазоне 1 – 4 м/с с разными технологическими параметрами предельные дальности сноса сильно отличаются и находятся в диапазоне 380 - 4420 м, при этом:

- определяющим масштаб (предельную дальность) сноса для конкретного типа БВС является скорость бокового ветра W_z при опрыскивании ($r_{xy} \approx 0{,}79$), которая нелинейно связана с масштабом сноса ($\sim W_z^{1,6}$ для заданных параметров БВС);

- рост рабочей скорости полета БВС в целом связан с увеличением предельной дальности сноса ($r_{xy} \approx 0{,}24$), в связи с чем для уменьшения сноса при опрыскивании целесообразно использовать умеренные скорости полета;

- для умеренных рабочих скоростей опрыскивания БВС (3-5 м/с) минимальный масштаб сноса обеспечивается на высотах около 3 м (на меньших высотах наблюдается рост сноса ввиду сложного взаимодействия при этом индуктивного следа БВС с подстилающей поверхностью);

Следует отметить, что показатель предельной дальности сноса является информативным с точки зрения оценки потенциального масштаба сноса как физического процесса, однако, оперируя исчезающе малыми величинами осадка в дальней периферийной зоне сноса, который во многих случаях выходят за принятые нижние пределы обнаружения (порядка 10^{-2} мл/га согласно [6]), не отражает количества и распределения рабочей жидкости во всей волне сноса, непосредственно определяющих потенциальный риск сноса и нуждающийся в обязательном учете. Одним из вариантов учета этого обстоятельства может быть использование подходов международного стандарта ISO 22866:2005, определяющего общие принципы и рекомендации по измерению сноса (дрейфа) капель от всех типов в основном наземного оборудования, предназначенного для применения средств защиты растений ([12], ISO). В этой связи на рис. 2 для примера показаны характерные интегральные распределения указанных показателей (Pn, Pq и Pp) в зоне сноса при выполнении БВС DJI Agras T20 (4 форсунки типа 110-01) опрыскивания с нормой 10 л/га при боковом ветре 2 м/с на скорости 5 м/с и высотах полета 5 и 3 м (варианты № 1 и 2 табл. 1).

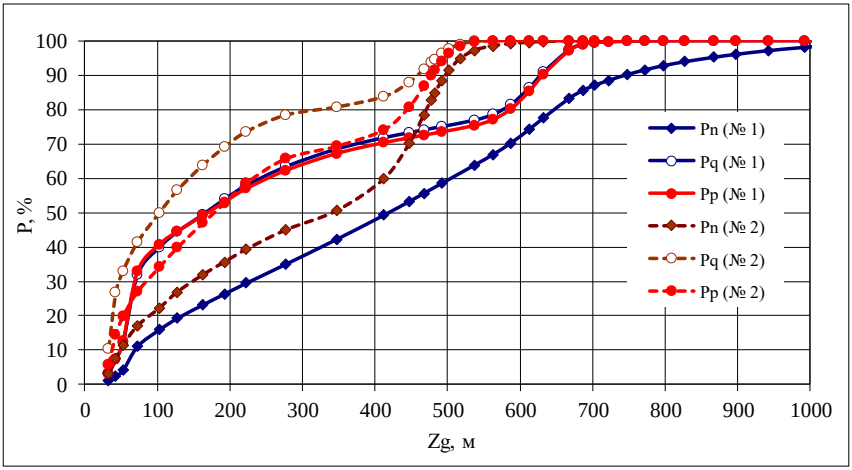


Рис. 2 Распределение показателей осадка рабочей жидкости в зоне сноса при выполнении гексакоптером DJI Agras T20 опрыскивания с нормой 10 л/га на скорости 5 м/с и высотах полета 5 (№ 1) и 3 м (№ 2) при боковом ветре 2 м/с

Как видно из представленного графика, для обоих вариантов границы сноса по количеству капель, объему жидкости и препарата, соответствующих уровню 90 % для них, существенно ниже представленных ранее предельных дальностей сноса и значительно отличаются для разных показателей каждого варианта.

В частности, для рассмотренного в настоящей работе типового варианта защитного опрыскивания БВС с нормой внесения водного 10-процентного раствора пестицида 10 л/га с его рабочей дозировкой 1000 мл/га вполне очевидно, что микроскопические осаждения этого препарата при сносе, например, пороги 0,1, 0,01 или 0,001 % от заданной дозировки (соответственно, 10^0, 10^{-1} и 10^{-2} мл/га), как представляется, не могут нанести значимый ущерб находящимся за пределами обрабатываемого участка объектам, однако, могут значительно изменить требования безопасных границ сноса. Например, для варианта опрыскивания № 1 (рис. 1) использование указанных выше пороговых дозировок будет эквивалентно границам примерно 90, 700 и 790 м, которые существенно отличаются от выявленных для этого варианта значений предельной дальности сноса (1530 м) и границы сноса по ISO (635 м по препарату) и могут существенно изменить правила организации и выполнения опрыскивания с применением БВС. В этой связи целесообразно выполнить уточнение методических подходов по выбору безопасных границ сноса на базе принятых для отдельных препаратов или их характерных групп относительных или абсолютных порогов дозировок, не представляющих опасности для объектов в зоне проведения обработок сельскохозяйственных культур.

Выводы

По результатам проведенных исследований сформирован и апробирован прикладной программный комплекс численного моделирования процессов и показателей опрыскивания БВС в сельском хозяйстве , с использованием которого на примере гексакоптера DJI Agras T20 получен обширный массив расчетно-теоретических и аналитических данных описания важных для практики показателей сноса водных растворов пестицидов при обработке в разных условиях полевых культур и выявлены характерные закономерности и особенности этого процесса. Результаты исследований могут быть использованы при решении актуальных научно-практических задач по совершенствованию методической базы оценки и нормирования сноса при внесении пестицидов в сельском хозяйстве и формировании безопасных регламентов их авиационного применения с применением БВС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Https://json.tv/ict_telecom_analytics_view/atlas-dronov-dlya-selskogo-hozyay-stva-shbla-i-rynok -2018-2025-gg-20181228115129.

2. Зубарев Ю.Н., Фомин Д.С., Чащин А.Н., Заболотнова М.В. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // *Вестник ПФИЦ.* 2019. N2. С. 47-51.

3. Analysis on the current situation and trend of plant protection UAVs in China in 2019, https://www.81uav.cn/uav-news/201910/20/64268.html.

4. Del Cerro J, Cruz Ulloa C, Barrientos A, et al. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey. Agronomy, 2021; 11(2): 203. doi: 10.3390/ agronomy11020203.

5. Chen H B, Lan Y B, Fritz B K, Hoffmann W C, Liu S B. Review of agricultural spraying technologies for plant protection using unmanned aerial vehicle (UAV). Int J Agric & Biol Eng, 2021; 14(1): 38–49. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211401.5714

6. State of the Knowledge Literature Review on Unmanned Aerial Spray Systems in Agri-culture. OECD Working Party on Pesticides (WPP), OECD Drone Sub-Group Bonds Consulting Group LLC, Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority. June 2021. - 34.

7. Техника и технология безопасного применения средств защиты растений: Лекции курсов по контролю за качеством применения пестицидов. - Госагропром СССР: Сиба-Гейги АГ, 1989.

8. Технические средства и технологические особенности применения гербицидов и арборицидов на объектах несельскохозяйственного пользования: Научно-практическое руководство. - М.: РАСХН-ГНУ ВНИИФ, 2009. — 68 с.

9. Опрыскивание от А до Я. 3-е изд. «Теория и практика опрыскивания». Lechler GmbH, Метцинген, Германия. 2020. - 80 с.

10. Асовский В.П. Теория и практика авиационного распределения веществ. - М.: Воздушный транспорт, 2008. - 580 с.

11. Асовский В.П., Кузьменко А.С. Численное моделирование защитного опрыскивания беспилотными воздушными судами вертолетного типа // Сельскохозяйственные машины и технологии, 2024. т. 18, № 3. - с. 63-74. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-3-63-74. EDN: FNNREO.

12. ISO 22866:2005. Equipment for crop protection - Methods for field measurement of spray drift: International Standards Organization.

Асовский Валерий Павлович, доктор технических наук, ученый секретарь НПК «ПАНХ», Россия, город Краснодар, ул. Кирова 138, 350000, e-mail: vasov63@mail.ru.

Кузьменко Алла Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры летательных аппаратов Южного федерального университета, 347900 Россия, город Таганрог, переулок Тургеневский, 44, e-mail: akuzm@sfedu.ru.

Асовский Алексей Валериевич, инженер-программист НПК «ПАНХ», Россия, город Краснодар, ул. Кирова 138, 350000, e-mail: asoval@mail.ru.

Asovsky Valery Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, scientific secretary of NPK «PANH», 350000, Russia, Krasnodar, 138 Kirova Str., e-mail: vasov63@mail.ru.

Kuzmenko Alla Sergeevna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Aircraft of Radio Engineering Southern Federal University, 347900, Russia, Taganrog, trans. Turgenevsky, 44, phone: +7 (8634) 37-16-97, e-mail: akuzm@sfedu.ru.

Asovsky Aleksej Valerievich, Software engineer of NPK «PANH», 350000, Russia, Krasnodar, 138 Kirova Str., e-mail: asoval@mail.ru.

УДК 53.088.7

Сердюков Владимир Владимирович, Коротков Константин Станиславович,
Строганова Елена Валерьевна, Голан Антон Васильевич

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЕКТОРНОГО ВОЛЬТМЕТРА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОГО РАДИОУСТРОЙСТВА PLUTO+

В работе представлен анализ методов реализации современных векторных вольтметров. Описан метод, основанный на применении программно-определяемого радио Pluto+ в составе векторного вольтметра. Описаны основные преимущества в сравнении с другими способами определения разности фаз. Представлена программная реализация измерителя разности фаз с помощью Pluto+. Проанализированы показания Pluto+ на различных частотах и составлены графики погрешностей.

Векторный вольтметр, программно-определяемое радио, pluto+, определение параметров цепи, свч, сдвиг фаз.

Serdyukov Vladimir Vladimirovich, Konstantin Stanislavovich Korotkov,
Stroganova Elena Valeryevna, Golan Anton Vasilyevich

IMPLEMENTATION OF A VECTOR VOLTMETER USING THE SOFTWARE-DEFINED RADIO PLATFORM PLUTO+

This work presents an analysis of modern vector voltmeter systems. A method based on the use of the Pluto+ software-defined radio (SDR) as part of a vector voltmeter is studied. The main advantages of this approach over other phase difference measurement techniques are described. Experimental results of phase difference measurements using the Pluto+ SDR are presented. The readings of the Pluto+ device at various frequencies were analyzed, and error graphs were constructed.

Vector voltmeter, software-defined radio, Pluto+, circuit parameter estimation, microwave, phase shift.

Введение

В современных системах СВЧ для анализа цепей используются векторные вольтметры. При анализе характеристик многополюсников перед исследователем стоит задача наиболее быстрого и точного измерения амплитуды и разности фаз сигналов. На данный момент были изобретены и описаны различные методы измерения разности фаз, но они могут быть использованы далеко не в каждой задаче. В связи с этим была предложена реализация векторного вольтметра на основе программно-определяемого радио Pluto+.

Современные методы измерения разности фаз. Для нахождения фазы и амплитуды сигнала используется выделение квадратур. Существует два вида выделения квадратур: цифровое и аналоговое [1].

Аналоговое выделение квадратур хоть и даёт достаточную точность для дальнейшего преобразования, но вместе с тем и имеет высокую стоимость. Кроме того, нужно учитывать сдвиги фаз в аналоговых смесителях и их идентичность. Поэтому сейчас чаще используется цифровое выделение квадратур [2].

Векторные вольтметры существуют в двух физических исполнениях: с использованием прямой оцифровки и с понижением частоты.

В векторном вольтметре с прямой оцифровкой сигнал попадает сразу в аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). Это накладывает ограничения на частоту входящего сигнала. Решают эту проблему векторные вольтметры с понижением частоты. В таких вольтметрах сигнал проходит через смеситель перед переходом в АЦП [3]. Далее АЦП передаёт сигналы компьютеру, где они проходят через алгоритмы для вычисления сдвига фаз.

Наиболее часто для создания векторных вольтметров используется метод, в котором синусоидальный сигнал преобразуется в меандр с помощью компаратора. Такие сигналы представлены на рисунке 1. В таком случае задержка фронтов меандров приравнивается к сдвигу фаз:

$$\varphi = \frac{t_{зад}}{T_1} \times 360°, \quad (1)$$

где $t_{зад}$ – разность во времени между фронтами, с; T1 – период сигнала из источника 1, с; φ – фаза сигнала, ° [4].

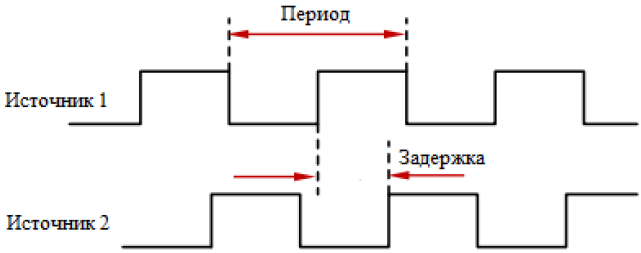


Рис. 1 Сравнение двух преобразованных сигналов для нахождения сдвига фазы

Ещё одним способом анализа цепей и нахождения их параметров [5] является корреляционный метод (рисунок 2). Для его применения необходимо найти функцию корреляционного коэффициента двух синусоид сигнала. По максимуму этой функции можно будет определить разность фаз двух сигналов.

$$Corr(\tau) = \sum_{t=0}^{N-1} s1(t)s2(t+\tau), \quad (2)$$

где τ – сдвиг сигнала 2, с; s1(t) и s2(t + τ) – значения амплитуды сигналов 1 и 2 в моменты времени t и t + τ соответственно, В [6].

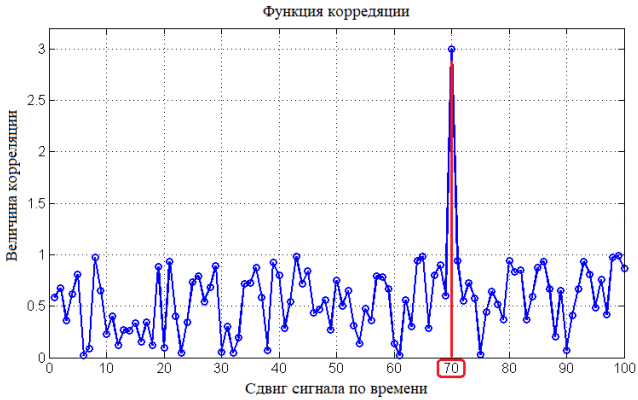


Рис. 2 график корреляционной функции с обозначением сдвига во времени, равного разности фаз двух сигналов

$$(Corr(\tau)), \tag{3}$$

где $t_{рас}$ – расчётное время максимальной корреляции сигналов, с [6].

Для выполнения вычислений, связанных с каждым из этих способов, можно как применять осциллограф, так и передавать его показания на электронно-вычислительное устройство. В первом случае результаты измерения будут обладать слишком большой погрешностью порядка 3% из-за того, что компаратор, преобразуя синусоиду в меандры путём сравнения амплитуды сигнала с нулём, даёт погрешность [2], что приводит к разной длине меандров и искажает задержку фронтов. Второй подход нивелирует этот недостаток, однако требует преобразования данных при их передаче из осциллографа на ЭВМ, что приводит к искажению результатов вследствие изменения характеристик системы из-за возросших тепловых нагрузок [7].

Программно-определяемое радио. Описанные выше методы реализации векторного вольтметра не соответствуют требованиям поставленных задач, поэтому был предложен метод измерения разности фаз с помощью программно-определяемого радио [8]. Pluto+ является одной из моделей программно-определяемого радио. Это устройство, способное принимать и передавать сигналы на частотах от 70 МГц до 6 ГГц [9]. Определение разности фаз производится по принципам, схожим с описанными выше. Но, в отличие от других, данный метод использует цифровое выделение квадратур и понижение частоты, что является наиболее экономически выгодным вариантом комбинации компонентов для данной точности конечных результатов. Принципиальная схема тестового стенда на базе Pluto+ для измерения разности фаз представлена на рисунке 3.

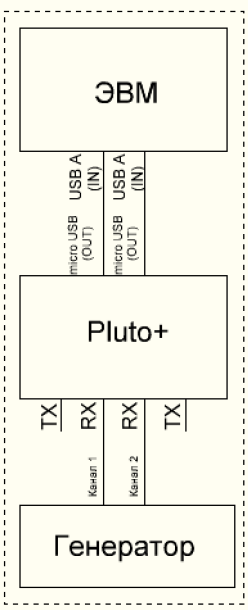


Рис. 3 Принципиальная схема тестового стенда на базе Pluto+ для измерения разности фаз

На два канала программно-определяемого радио подаются две синусоиды, которые обрабатываются Pluto+. Программно-определяемое радио вычисляет разность фаз [10]. При этом Pluto+ обладает своими параметрами чувствительности, влияющими на его показания при измерениях на различных частотах, поэтому был составлен график погрешностей, помогающий определить частоту, коррелирующую с определёнными задачами пользователя. Для разблокировки полного функционала программно-определяемого радио и доступа к двум симплексным каналам приема необходимо переписать параметры системы Pluto+, поскольку это аппаратно улучшенная версия базового программно-определяемого радио PlutoSDR, имеющего лишь один симплексный канал приема. Для перепрошивки необходимо изменить название аналогово-цифрового преобразователя с AD9363 на AD9361 и задать количество каналов на 2r2t. Помимо этого, для программирования приемника была использована библиотека для Python – PyADI-IIO на базе LibIIO. Данная библиотека значительно упрощает общение с ARM микроконтроллером Pluto+ и позволяет записывать значения сигналов на обоих входах с заданной частотой дискретизации в два массива данных заданной длины. Далее данные из этих массивов, представленные в виде комплексных чисел, преобразуются для графического представления сигналов. На рисунке 4 представлена лабораторная установка для тестирования и отладки системы.

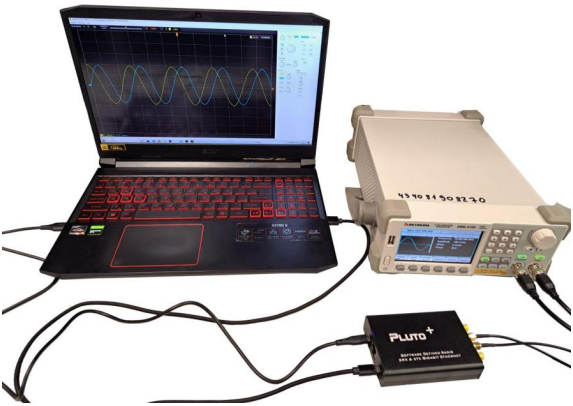


Рис. 4 Тестирование векторного вольтметра на основе Pluto+

Выводы

Были рассмотрены различные варианты реализации векторного вольтметра и в результате их сравнения был сделал вывод, что векторный вольтметр на основе ПОР Pluto+ обладает высокой точностью, а также имеет более низкую стоимость по сравнению с другими векторными вольтметрами. Был проведён эксперимент на программно-определяемом радио. Результаты работы векторного вольтметра на основе Pluto+ выли выведены на экран вычислительной машины. В программе MatLab был построен график зависимости погрешностей измерения разности фаз от частоты сравниваемых сигналов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сердюков В. В. и др. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗНОСТИ ФАЗ В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ И СВЧ ИНТЕРФЕЙСНЫХ МОДУЛЯХ СИСТЕМ СВЯЗИ С МНОГОУРОВНЕВЫМИ ФОРМАТАМИ МОДУЛЯЦИИ // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – №. 4 с. 157-169, DOI 10.18522/2311-3103-2024-4-157-169

2. Ридико Леонид DDS: прямой цифровой синтез частоты // Компоненты и Технологии. 2001. №17. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/dds-pryamoy-tsifrovoy-sintez-chastoty (дата обращения: 24.05.2025).

3. Николаенко А. Ю., Львов А. А., Юрков Н. К. СВЧ-ИЗМЕРИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО ВЕКТОРНОГО ВОЛЬТМЕТРА В СИСТЕМАХ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ //Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2019. – №. 4 (48). – С. 164-175.

4. DS1000Z Series Digital Oscilloscope, RIGOL Technologies, 2014. https://www.batronix.com/pdf/Rigol/UserGuide/DS1000Z_UserGuide_EN.pdf.

5. Дьяконов Владимир СОВРЕМЕННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ВЕКТОРНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ ЦЕПЕЙ // Компоненты и Технологии. 2014. №2

6. Santamaría I., Pokharel P. P., Principe J. C. Generalized correlation function: definition, properties, and application to blind equalization //IEEE Transactions on Signal Processing. – 2006. – Т. 54. – №. 6. – С. 2187-2197.

7. Казачек, М. В. Счетчик корреляций на базе осциллографа и компьютера / М. В. Казачек, Т. В. Гордейчук // Приборы и техника эксперимента. – 2019. – № 1. – С. 28-29. – DOI 10.1134/S0032816219010117. – EDN VUFDBD.

8. Кувшинов О. А., Плохих О. В. Применение программно-определяемого радио в системах связи //Ural Radio Engineering Journal. 2022. Vol. 6.№ 2. – 2022. – Т. 6. – №. 2. – С. 140-159.

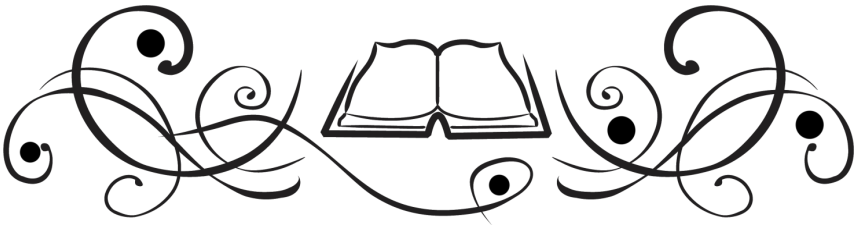
9. Сердюков В.В., Калюжная С.Е., Голан А.В., и др. / Измерение фазовых сдвигов сигналов с использованием быстрого преобразования Фурье в GNURadio // Ural Radio Engineering Journal. 2024; Т. 8, № 4, с. 469–481. DOI: 10.15826/urej.2024.8.4.004.

10. Логинов, И. В. Программно-определяемое радио с прямой оцифровкой принятого сигнала и обработкой в высокоскоростной ПЛИС / И. В. Логинов, А. В. Ульянов, Р. В. Шибеко // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, в 3 ч., Комсомольск-на-Амуре, 06–10 апреля 2020 года. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2020. – С. 301-304. – EDN OHERID.

Авторы: Сердюков Владимир Владимирович, преподаватель Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040, телефон: +7 (952) 852-41-56, email: serdyukov-vladimir1996@mail.ru.
Коротков Константин Станиславович, профессор Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040.
Строганова Елена Валерьевна, профессор Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040.
Голан Антон Васильевич, студент Кубанского государственного университета, Россия, город Краснодар, улица Ставропольская 149, 350040.

Authors: Serdyukov Vladimir Vladimirovich, lecturer at Kuban State University, 350040, Russia, Krasnodar, 149 Stavropolskaya street, phone: +7 (952) 852-41-56, email: serdyukov-vladimir1996@mail.ru.
Korotkov Konstantin Stanislavovich, Professor, Kuban State University, 149 Stavropol Street, 350040, Krasnodar, Russia.
Stroganova Elena Valeryevna, Professor, Kuban State University, 149 Stavropol Street, 350040, Krasnodar, Russia.
Golan Anton Vasilyevich, student of Kuban State University, Russia, city of Krasnodar, 149 Stavropol Street, 350040.

Секция
Современные микро- и наноэлектронные системы и технологии



УДК 538.956

Нагаенко Александр Владимирович, Мальцев Максим Михайлович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Активное применение пьезокерамических материалов в современный устройствах электронной техники связанно с широким диапазоном их свойств, которые зависят как от природы этих материалов, так и от способа их получения. Стабильность работы пьезоэлектрических преобразователей во многом зависит от условий их эксплуатации, давление, температура, вибрация и т.д.. Одним из основных воздействий влияющих на стабильность электрофизических параметров пьезокерамических материалов, а следовательно, и преобразователей на их основе является температура. В работе было проведено исследование зависимости параметров пьезоматериалов от температуры.

Сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, пьезокерамика, электрофизические параметры

Nagaenko Alexandr Vladimirovich, Maltsev Maxim Mikhailovich

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF PIEZOCERAMIC MATERIAL

The active use of piezoceramic materials in modern electronic devices is associated with a wide range of their properties, which depend both on the nature of these materials and on the technology of their production. The stability of piezoelectric transducers largely depends on their operating conditions, pressure, temperature, vibration, etc. One of the main influences affecting the stability of the electrophysical parameters of piezoceramic materials, and therefore of transducers based on them, is temperature. The paper investigated the dependence of piezoelectric materials parameters on temperature.

Ferroelectrics, piezoelectrics, piezoceramics, electrophysical parameters

Все пьезокерамические материалы принято разделять на сегнетомягкие, сегнетожёсткие и средней жёсткости. Сегнетожёсткость материалов во многом определяется величиной локальных упругих напряжений, возникающих при переориентации доменов [1, 2]. Отнесение материалов к тому или инному классу сегнетожёсткости и стабильность их параметров от внешних воздействий таких как электрические и механические поля, давления температура будут определять области их применения. Сегнетожёсткие материалы в виду достаточно высоких знечений диэлектрической проницаемости, механической добротности, коэрцитивных полей и стабильности к внешним воздействиям находят активное применение при конструировании гидроакустических преобразователях

работающих в режимах приема, пьезотрансформаторов, пьезодвигателях и т.д. [3, 4].

В качестве модельного объекта был выбран сегнетожёсткий пьезокерамический материал $PbTiO_3$–$PbZrO_3$–$PbNb_{2/3}Zn_{1/3}O_3$–$PbNb_{2/3}Mn_{1/3}O_3$, который синтезировался методом твердофазных реакций из оксидов и карбонатов металлов в две стадии при максимальной температуре 850°С между которыми осуществлялся помол в планетарной мельнице с центробежным ускорением 29g. Качество исходных компонентов как и продуктов синтеза контролировалось методами дифференциально-термического и рентгенофазового анализов. Синтезированный материал дополнительно измельчался в планетарной мельнице в течении 2 ч.

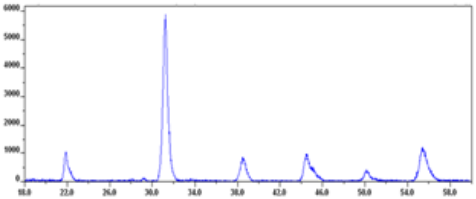


Рис. 1 Рентгенофазовый анализ пьезокерамического материала после синтеза при температуре 850°С

Из результатов, представленных на рисунке 1 видно, что синтез целевого материала при температуре 850°С прошёл полностью, на рентгенограмме отсутствуют пики характерные для исходных компонентов, промежуточных соединений и примесных фаз.

Образцы пьезоэлементов для исследования получали по керамической технологии [5 – 7]. Спекание заготовок осуществлялось классическим методом, который включает, последовательное прессование и спекание заготовок в атмосфере паров PbO предотвращающих его улетучивание при высоких температурах. Время выдержки составляло 2 ч., а температура спекания варьировалась в диапазоне от 1200 до 1300°С.

Все образцы характеризуются достаточно высокими значениями плотности керамики. Наибольшей плотностью обладают керамики, полученные при температуре спекания 1275°С (таблица 1).

Таблица 1

Значения плотности спеченной керамики

Температура спекания $T_{сп}$, °С	Плотность спечённых образцов ρ, г/см^3
1200	7,41
1225	7,56
1250	7,56
1275	7,60
1300	7,32

Из представленных в таблице 1 данных можно сделать вывод, что режим спекания образцов обеспечивающий их высокую плотность лежит в достаточно

широком диапазоне от 1125 до 1275°С. Однако, стоит отметить, что увеличение температуры спекания до 1300 °С приводит к снижению плотности керамических образцов. Такое поведение может говорить о начинающихся процессах деструкции в керамических образцах в следствии испарения окиси свинца (PbO) [5 –8].

С целью оценки пьезоактивности исследуемого пьезокерамического материала и установления его максимальной рабочей температуры после которой сегнетоэлектрик переходит в параэлектрическое состояние [8 – 10], были исследованы петли диэлектрического гистерезиса и определена температура Кюри (таблица 2).

Таблица 2

Поляризационные характеристики пьезоматериала

Температура спекания $T_{сп}$, °С	$E_{коэрц}$, В/мм	$P_{ост}$, нКл/мм^2	$T_к$, °С
1200	1050	1150	290
1225	1000	1230	
1250	980	1450	
1275	950	1100	
1300	950	980	

Из таблицы 2 видно, что величина остаточной поляризации $P_{ост}$ проходит через максимум, который соответствует температуре 1250°С при этом стоит отметить, что величина коэрцитивного поля E_c, уменьшается с ростом температуры спекания.

На основании проведённых исследований были подобраны режимы поляризации пьезоэлементов, которые были изготовлены в виде дисков диаметром 10 мм и высотой 1 мм. Поляризация заготовок осуществлялась в жидком диэлектрике электрическим полем 2,5 В/мм. По истечении семи дней после поляризации на пьезоэлементах контролировались электрофизические параметры (таблица 3).

Таблица 3

Электрофизические параметры пьезокерамических элементов

Температура спекания $T_{сп}$, °С	tgδ, %	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	d_{31}, пКл/Н	V_1^E, м/с	K_{eff}
1200	0,36	1476	198	2873	0,54
1225	0,33	1740	215	2869	0,57
1250	0,35	1700	211	2843	0,57
1275	0,31	1593	204	2852	0,57
1300	0,42	1533	188	2849	0,53

Анализ данных представленных в таблице 3 показывает прохождение свойств пьезокерамических элементов через максимум при температуре спекания 1225°С. Относительно не высокие значения параметров пьезоэлементов полученных при температуре 1200°С по всей видимости свидетельствуют о недостаточности температуры для завершения процессов спекания. Возрастание значений тангенса угла диэлектрических потерь и снижение основных параметров образцов при температуре 1300°С, подтверждает ранее сделанное предположение о начинающихся процессах

деструкции. В связи с чем образцы изготовленные при температурах спекания 1200 и 1300°С в дальнейшем исследовании не рассматривались.

Проверку необратимых изменений значений пьезомодуля d_{31}, тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ и относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ после воздействия пониженной температуры минус (35 ± 2)^{0}С и повышенной температуры плюс (180 ± 2)^{0}С проводили на образцах спеченных при температурах 1225–1275°С (таблица 4).

Таблица 4

Необратимые изменения электрофизических параметров пьезокерамики

Тем-ра спекания $T_{сп}$, °С	Параметры до воздействия температуры			Параметры после воздействия повышенной температуры			Уходы значений в % после воздействия повышенной температуры			Параметры после воздействия пониженной температуры			Уходы значений в % после воздействия повышенной температуры		
	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	tgδ, %	d_{31}, пКл/Н	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	tgδ, %	d_{31}, пКл/Н	$\lvert\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0\rvert$	$\lvert tg\delta\rvert$	$\lvert d_{31}\rvert$	$\lvert\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0\rvert$	tgδ, %	d_{31}, пКл/Н	$\lvert\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0\rvert$	$\lvert tg\delta\rvert$	$\lvert d_{31}\rvert$
1225	1740	0,33	215	1981	0,42	180	13,8	27,2	16,3	1930	0,45	180	10,9	36,3	16,3
1250	1700	0,35	211	1991	0,46	184	17,1	31,4	12,8	1896	0,48	180	11,5	37,1	14,7
1275	1593	0,31	204	1895	0,40	175	18,9	29,0	14,2	1825	0,39	173	15,2	25,8	15,2

Из представленных данных видно, что изменения значений пьезомодуля d_{31} статической емкости C_0 не превышают 20% для всех представленных образцов. Не смотря более значительное изменение тангенса угла диэлектрических потерь $tg\delta$ (25 – 37%) при воздействии на образцы повышенной и пониженной температур его значения остаются в допускаемых пределах ($tg\delta \leq 0{,}55$) характерных для данной группы материалов.

Проверку обратимых изменений значений пьезомодуля d_{31} и относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ при воздействии пониженной температуры минус (35 ± 2)°С и повышенной температуры плюс (80 ± 2)°С проводили на образцах спеченных при температурах 1225–1275°С (рисунок 2).

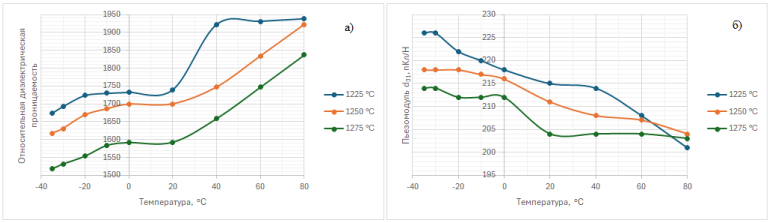


Рис. 2 Обратимые измененич относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ (а) и пьезомодуля d_{31} (б) при воздействии пониженной и повышенной температуры

Из графиков представленных на рисунке 2 видно, что параметры всех образцов достаточно стабильны при воздействии на них температуры, изменение относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ составляет 3,8 – 15,3%, а пьезомодуля d_{31} 0,5 – 6,5%. При этом стоит отметить, что пьезокерамические элементы спеченные при температуре 1225°С обладают наилучшей совокупностью основных электрофизических параметров при минимальных их изменениях при воздействии пониженной и повышенной температуры, а

следовательно данная температура является оптимальной для производства данного пьезокерамического материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панич А.А., Мараховский М.А., Мотин Д.В. Кристаллические и керамические диэлектрики. Инженерный вестник дона, 2011, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/325.

2. Глозман И.А. Пьезокерамика. – М.: Энергия, 1972. – 288 с.

3. Boumchedda K. Properties of a hydrophone produced with porous PZT ceramic [Text] / K. Boumchedda, M. Hamadi, G. Fantozzi // Journal of the European Ceramic Society. 2007. Vol. 27. P. 4169-4171.

4. Аронов Б.С. Электромеханические преобразователи из пьезоэлектрической керамики/ Б.С. Аронов // Энергоатомиздат, 1990. -272 с.

5. Прилипко Ю.С. Функциональная керамика. Оптимизация технологии / Ю.С. Прилипко // Донецк: Норд-Пресс, 2007.-492 с.

6. Нагаенко А.В., Панич А.Е., Свирская С.Н., Малыхин А.Ю., Скрылёв А.В. Управление свойствами пьезокерамического материала системы ЦТС, используемого в гидроакустических излучателях. Инженерный вестник Дона, 2016, №2: [сайт]. — URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3585.

7. Желудев И.С. Основы сегнетоэлектричества. – М: Атомиздат, 1973. – 472 с.

8. Нестеров А.А. Технологии синтеза порошков сегнетоэлектрических фаз: учебное пособие / А.А. Нестеров, А.Е. Панич. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2010. – 226 с.

9. Свирская С.Н. Технология пьезокерамических материалов: учебное пособие Ч.2/ С.Н. Свирская, А.Е. Панич – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2008. – 92 с.

10. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков. – М.: Энергия, 1976 – 336 с.

Автор: Нагаенко Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Института высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова 10, телефон: +7(904)5061082, e-mail: nagaenko@sfedu.ru

Автор: Мальцев Максим Михайлович, студент, Институт высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Россия, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова 10, телефон: +7(961)4698577, e-mail: vfrcbv.2003.vfrcbv@yandex.ru

Author: Nagaenko Alexander Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of the Institute of High Technologies and Piezotechnics of the Southern Federal University, Russia, Rostov-on-Don, 10 Milchakova str., phone: +7 (904)5061082, e-mail: nagaenko@sfedu.ru

Author: Maltsev Maxim Mikhailovich, student, Institute of High Technologies and Piezotechnics of the Southern Federal University, Russia, Rostov-on-Don, 10 Milchakova str., phone: +7(961)4698577, e-mail: vfrcbv.2003.vfrcbv@yandex.ru

УДК 621.375.9

Сергеенко Марсель Алексеевич, Жук Алексей Андреевич,
Прокопенко Николай Николаевич

Разработка и исследование выходного каскада для GaAs высокотемпературных операционных усилителей

Аннотация – Одним из векторов развития аналоговой схемотехники, в т.ч. операционных усилителей, предназначенных для работы в расширенном диапазоне температур, является применение GaAs технологических процессов, допускающих использование только p-n-p биполярных и полевых транзисторов с управляющим p-n переходом и n-каналом. Успешность данного направления зависит от схемотехнических решений выходных каскадов, реализуемых в таком ограниченном элементном базисе. Разработан и исследован GaAs выходной каскад операционных усилителей, выполнено его компьютерное моделирование в среде LTSpice при разных сопротивлениях нагрузки и двух вариантах построения применяемого в схеме токового зеркала. Показано, что рассматриваемый каскад имеет высокое входное сопротивление и обеспечивает максимальную амплитуду для положительного и отрицательного входного напряжения, близкую к напряжениям питания.

Ключевые слова – выходной каскад, операционный усилитель, GaAs, высокотемпературная микросхема, амплитудная характеристика, совмещенный GaAs технологический процесс, JFET с n-каналом, p-n-p биполярный транзистор.

Sergeenko Marsel Alekseyevich, Zhuk Aleksey Andreevich,
Prokopenko Nikolay Nikolayevich

DESIGN AND RESEARCH OF OUTPUT STAGE FOR GaAs HIGH-TEMPERATURE OPERATIONAL AMPLIFIERS

Abstract – One of the vectors of development of analog circuitry, including operational amplifiers designed to operate in an extended temperature range, is the application of GaAs technological processes allowing the use of only p-n-p bipolar and field-effect transistors with a control p-n junction and n-channel. The success of this direction depends on circuitry solutions of output stages realized in such a limited element base. GaAs transistors have been developed and investigated GaAs output stage of operational amplifiers, its computer modeling in LTSpice environment has been developed and investigated. modeling in LTSpice environment at different load resistances and two variants of construction of the applied circuitry. variants of construction of the current mirror used in the circuit. It is shown that the considered stage has high input impedance and provides maximum amplitude for positive and negative input voltages, close to the supply voltage.

Keywords - output stage, operational amplifier, GaAs, high-temperature circuit, amplitude response, combined GaAs engineering procedure, n-channel JFET, p-n-p bipolar transistor.

Введение

Применение широкозонных полупроводников, в т.ч. GaAs транзисторов, относится к числу актуальных направлений развития современной микроэлектроники [1-2]. В настоящее время рядом микроэлектронных фирм разработаны так называемые совмещенные технологические процессы [3-6], реализующие JFET с n-каналом и биполярные транзисторы p-n-p типа. Такой ограниченный элементный базис затрудняет схемотехническую реализацию практических схем выходных каскадов (ВК) и отрицательно сказывается на основных параметрах ВК – максимальных токах нагрузки и максимальных амплитудах выходного напряжения при положительной и отрицательной полярностях.

Цель и новизна настоящей работы состоит в исследовании новой схемы GaAs ВК, которая может быть реализована на совмещенных технологических процессах [3-6], в т.ч. осваиваемых Минским НИИ радиоматериалов [7-8].

Структура GaAs выходного каскада

Схема предлагаемого выходного каскада операционного усилителя (ОУ), который может выпускаться и в виде самостоятельной микросхемы буферного усилителя (БУ), представлена на рис. 1. Он содержит входной полевой транзистор VT1, статический ток стока которого изменяется в незначительных пределах в широком диапазоне изменения тока в нагрузке и равен току двухполюсника $I_1=I_0$. В цепь отрицательной обратной связи включается токовое зеркало на транзисторах VT4, VT5.

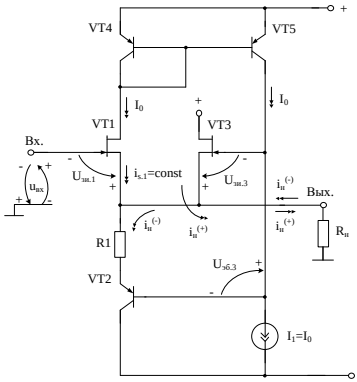


Рис. 1 GaAs выходной каскад (буферный усилитель)

При положительных входных напряжениях ток в цепи нагрузки Rн обеспечивается транзистором VT3. Когда на вход ВК подается отрицательное напряжение, транзистор VT1 подзапирается. При этом уменьшается выходной ток токового зеркала (ток коллектора VT5), что приводит к формированию отрицательного тока в нагрузке $i_н^{(-)}$. Резистор R1 обеспечивает ограничение

эмиттерного тока транзистора VT2 и в некоторых случаях может иметь малое сопротивление.

Результаты компьютерного моделирования

Схема рассматриваемого БУ (рис. 1) исследовалась в среде LTSpice на моделях GaAs биполярных и полевых транзисторов Дворникова О.В. [8] для двух случаев – когда в схеме используется идеальное токовое зеркало (рис. 2) и когда токовое зеркало реализовано на двух биполярных p-n-p GaAs транзисторах (VT4, VT5, рис. 3).

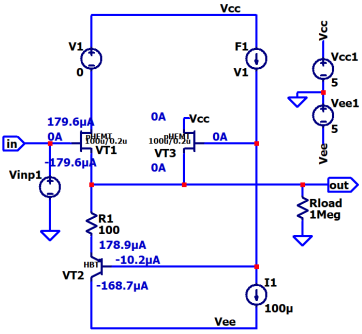


Рис. 2 Статический режим GaAs БУ с идеальным токовым зеркалом (F1) и I1=100мкА, Rload = 1МОм, R1 = 100Ом

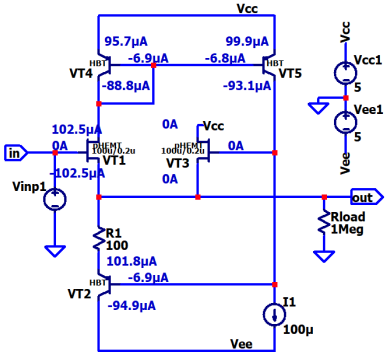


Рис. 3 Статический режим GaAs БУ при реализации токового зеркала по классической схеме на транзисторах VT4, VT5 и I1=100мкА, Rload = 1МОм, R1 = 100Ом

Результаты компьютерного моделирования амплитудной характеристики GaAs БУ на рис. 2 при разных сопротивлениях нагрузки приведены на рис. 4.

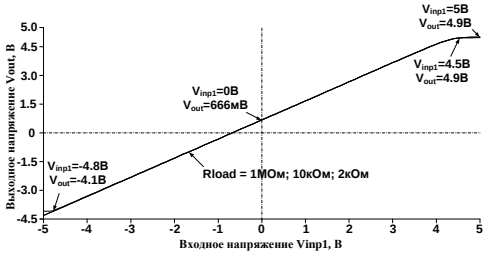


Рис. 4 Амплитудная характеристика GaAs БУ на рис.2 в среде LTspice I1=100мкА, Rload = 1МОм; 10кОм; 2кОм, R1 = 100Ом

Таким образом, рассматриваемый буферный усилитель (выходной каскад) обеспечивает выходные напряжения положительной и отрицательной полярностей, близкие к напряжениям питания в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки.

Если токовое зеркало реализовано в виде классической схемы на двух транзисторах VT4, VT5 (рис. 3), то амплитуда положительного выходного напряжения каскада отличается от напряжения питания Vdd на 1-1,5 В. Этот эффект связан с влиянием статического напряжения на входе токового зеркала ($U_{Т3.вх}$), которое определяется напряжением эмиттер-база транзистора VT4 ($U_{Т3.вх} \approx U_{эб.4}$). Устранение данного недостатка возможно за счет использования специальных токовых зеркал, обладающих малым статическим напряжением на входе.

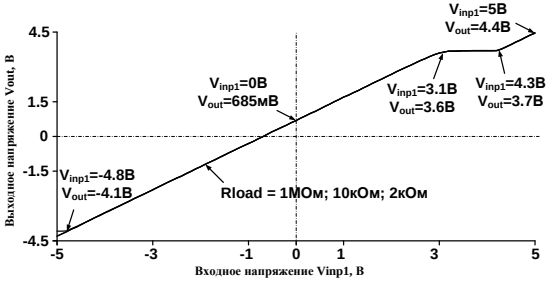


Рис. 5 Амплитудная характеристика БУ на рис.3 в среде LTspice при I1=100мкА, Rload = 1МОм; 10кОм; 2кОм, R1 = 100Ом

GaAs аналоговые электронные схемы отличаются расширенным диапазоном рабочих частот (см., например, [10], а также микросхему фирмы Analog Devices ADL8142-2 [9]). Результаты компьютерного моделирования логарифмической амплитудно-частотной характеристики БУ на рис. 2 приведены на рис. 6.

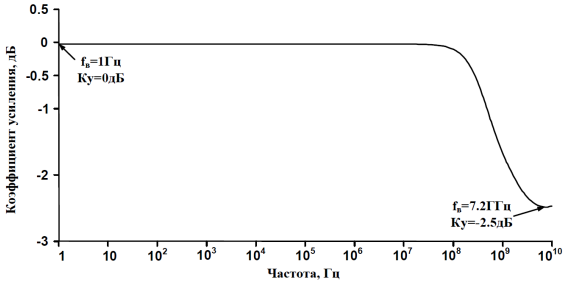


Рис. 6 Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика БУ на рис.2 в среде LTspice при I1=100мкА, Rload =2кОм, R1 = 100Ом, Vcc=-Vee=5В

Таким образом, БУ на рис. 6 обеспечивает единичный коэффициент передачи в диапазоне частот до 7 ГГц.

Выводы

Разработан и исследован широкополосный GaAs буферный усилитель, который может использоваться в структуре аналоговых микросхем различного назначения, например, операционных усилителях, активных RC фильтрах, компенсационных стабиизаторах напряжения. Рассмотренная схема обеспечивает при напряжениях питания ±5В максимальные амплитуды выходных напряжений, близких к напряжениям питания в диапазоне частот до 7 ГГц.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10069, https://rscf.ru/project/23-79-10069/.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Zampardi P., Cismaru C., Li J., Metzger A., Shen H., Sun M., Rushing L., Ramanathan R., Yota J., Machuga S., and Weller K. High-volume manufacturing considerations for III-V merged HBT-FET (BiFET) technologies // CS-MAX 2005 Tech. Dig., Palm Springs, CA, Jan. 2005, pp. 32–34.

2. Zampardi P. J., Sun M., Cismaru C. and Li J. Prospects for a BiCFET III-V HBT Process // 2012 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), La Jolla, CA, USA, 2012, pp. 1-3. doi: 10.1109/CSICS.2012.6340116.

3. Патент № 5.068.756 USA, МПК H01L 29/161. Integrated circuit composed of group III-V compound field effect and bipolar semiconductors: № 554,116 : заявл. 18.07.1990 : опубл. 26.11.1991 / Morris Francis J. et al.; заявитель : Texas Instruments Inc., – 48 с. : ил. – Текст : непосредственный.

4. Патент 5.250.826 USA, МПК H01L 29/72. Planar HBT-FET Device: № 949,901 : заявл. 23.09.1992 : опубл. 5.10.1993 / Chang Mau-Chung F. et al.; заявитель Rockwell International Corp., - 5 с. : ил. - Текст : непосредственный.

5. Yang J. Y., Morris F. J., Plumton D. L., and Jeffrey E. N. J. GaAs BIJFET technology for linear circuits // Dig. 1989 GaAs IC Symp., pp. 341–344.

6. Патент 5.077.231 USA, МПК H01L 21/18. Method to integrate HBTs and FETs : № 670,094 : заявл. 15.03.1991 : опубл. 31.12.1991 / Plumton; Donald L. et al.; заявитель Texas Instruments Inc., – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.

7. Унифицированные схемотехнические решения аналоговых арсенид-галлиевых микросхем / О.В. Дворников [и др.] // Известия вузов. Электроника. 2022. Т. 27. № 4. С. 475–488. DOI: https://doi.org/10.24151/1561-5405-2022-27-4-475-488.

8. Дворников О.В., Павлючик А.А., Прокопенко Н.Н., Чеховский В.А., Кунц А.В., Чумаков В.Е. Арсенид-галлиевый аналоговый базовый кристалл // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). - 2021. - Выпуск 2. - С. 47-54. doi:10.31114/2078-7707-2021-2-47-54

9. Fresina M. Trends in GaAs HBTs for wireless and RF // Bipolar/BiCMOS Circuits and Technology Meeting J. IEEE. – 2011. – Pp. 150-153.

10. Lee W. et al. InGaP/GaAs HBT broadband power amplifier IC with 54.3% fractional bandwidth based on cascode structure // 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). – IEEE, 2019. – С. 1299-1302.

Автор: Сергеенко Марсель Алексеевич, студент кафедры «Информационные системы и радиотехника» Донского государственного технического университета, Россия, город Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344003, телефон: +79185704519, email: mars1327el@gmail.com.

Автор: Жук Алексей Андреевич, ассистент кафедры «Информационные системы и радиотехника» Донского государственного технического университета, Россия, город Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344003, телефон: +79185880301, email: alexey.zhuk96@mail.ru.

Автор: Прокопенко Николай Николаевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и радиотехника», Донской государственный технический университет, Россия, город Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344003, телефон: +79281201984, email: prokopenko@sssu.ru.

Author: Sergeenko Marsel Alekseyevich**,** student of Department of Information Systems and Radio Engineering of Don State Technical University, Russia, Gagarin's sq., 1, 344003 Rostov-on-Don, phone: +79185704519, email: mars1327el@gmail.com.

Author: Zhuk Alexey Andreevich**,** assistant of Department of Information Systems and Radio Engineering of Don State Technical University, Russia, Gagarin's sq., 1, 344003, Rostov-on-Don, phone: +79185880301, email: alexey.zhuk96@mail.ru.

Author: Prokopenko Nikolay Nikolayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Information Systems and Radio Engineering» of Don State Technical University, Russia, Gagarin's sq., 1, 344003, Rostov-on-Don, phone: +79281201984, email: prokopenko@sssu.ru.

УДК 621.375.9

Жук Алексей Андреевич, Клейменкин Дмитрий Владимирович

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЙ МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ СОБСТВЕННОГО ТОКОПОТРЕБЛЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ КЛАССИЧЕСКИХ ВЫХОДНЫХ КАСКАДОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Аннотация – В современных буферных усилителях (БУ), в т.ч. выходных каскадах операционных усилителей на основе комплементарных составных транзисторов, существует жесткая взаимосвязь между максимально возможным током в нагрузке и статическим током, потребляемым схемой от источников питания. В статье рассматривается схемотехнический прием устранения этого недостатка, который базируется на использовании нелинейной корректирующей цепи, сравнивающей входное и выходное напряжение БУ и обеспечивающей увеличение подстройки базы выходных транзисторов при значительных рассогласованиях между входным и выходным напряжениями. Выполнено компьютерное моделирование схем на биполярных транзисторах при изменении сопротивлений нагрузки в широких пределах. Представлены схемы выходных каскадов, адаптированные под CCMOS, в т.ч. КНИ, технологические процессы. Показано, что предлагаемая схемотехника обеспечивает также повышение максимальной скорости нарастания выходного напряжения БУ при импульсном изменении входного напряжения, как для положительной, так и для отрицательной полярностей.

Ключевые слова – выходной каскад ОУ, максимальный ток в нагрузке, собственное токопотребление, максимальная скорость нарастания выходного напряжения, максимальная амплитуда выходного напряжения, высокотемпературная микросхема.

Aleksey Andreevich Zhuk, Kleimenkin Dmitry Vladimirovich

CIRCUIT METHOD OF REDUCING THE INTRINSIC CURRENT CONSUMPTION AND INCREASING THE PERFORMANCE OF CLASSICAL OPERATIONAL AMPLIFIER OUTPUT STAGES ON COMPLEMENTARY TRANSISTORS

Abstract – In modern buffer amplifiers (BA), including output stages of operational amplifiers based on complementary compound transistors, there is a hard relationship between the maximum possible current in the load and static current consumed by the circuit from power supplies. The paper considers a circuit technique to eliminate this disadvantage, which is based on the use of a nonlinear correction circuit that compares the input and output voltage BA and provides an increase in the adjustment of the base of output transistors at significant mismatch between the input and output voltages. Computer modeling of circuits on bipolar transistors at change of load resistances in wide limits is executed. Output stage schematics adapted to CCMOS, including SoI, process flows are presented. It is shown that the proposed

circuitry also provides an increase in the maximum slew rate of the output voltage BA at pulse changes of the input voltage, both for positive and negative polarities.

Keywords – output stage Op-Amp, maximum current in the load, its own current consumption, maximum output voltage slew rate, maximum output voltage amplitude, high-temperature microchip.

Введение

Для классических буферных усилителей (БУ) на комплементарных биполярных транзисторах [1-5] характерны взаимосвязь и противоречивые требования по статическому токопотреблению, максимальному току в нагрузке и быстродействию в режиме большого сигнала.

Цель и новизна настоящей статьи состоит в исследовании влияния специальных цепей нелинейной коррекции, сравнивающих входные и выходные напряжения БУ и формирующих при больших рассогласованиях соответствующие корректирующие воздействия на входы двух токовых зеркал, согласованных с шинами положительного (ПТ1) и отрицательного (ПТ2) источников питания.

Схема предлагаемого БУ на CBJT транзисторах приведена на рис. 1. Она содержит входные (VT1, VT2) и выходные (VT3, VT4) транзисторы. Статический режим БУ устанавливается источником опорного тока I_1, который может измеряться десятками-сотнями микроампер. Транзисторы цепей нелинейной коррекции (VT5, VT6) при малых входных сигналах находятся в запертом состоянии и практически не влияют на работу схемы.

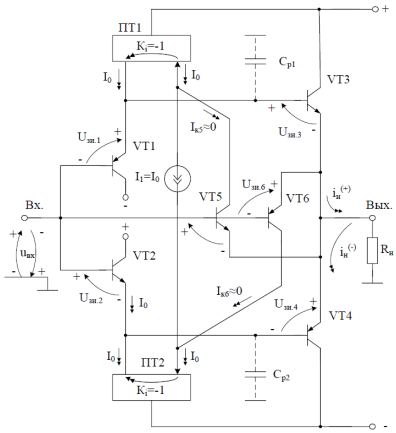


Рис. 1 CBJT буферный усилитель с цепями нелинейной коррекции VT5, VT6

Если на вход БУ баз VT5, VT6 подается положительное входное напряжение ($u_{вх}^{(+)}$), то это вызывает «подзапирание» транзистора VT1 и увеличение тока базы транзистора VT3, который создает в нагрузке ток $i_н^{(+)}$

положительного направления. Однако, этот ток не может быть больше, чем ток двухполюсника $I_1=I_0$. Как следствие, максимальный ток в нагрузке БУ без НКЦ определяется по формуле (1):

$$I_{max.н}^{(+)} = \beta_3 I_0, \quad (1)$$

где β_3 - коэффициент усиления по току базы транзистора VT3.

По мере увеличения $u_{вх}$ в схеме рис.1 увеличивается разница между входным и выходным напряжением БУ, что приводит к увеличению эмиттерного тока транзистора VT5 и, следовательно, входного и выходного токов токового зеркала ПТ1. Как следствие, это увеличивает максимально возможный положительный ток в нагрузке R_{load}. Аналогично работает цепь нелинейной коррекции на транзисторе VT6 при отрицательных $u_{вх}$.

На рис. 2 приведена схема предлагаемого БУ при ее реализации на КНИ комплементарных CMOS транзисторах, что позволяет увеличить диапазон рабочих температур до 200 °С. В данной схеме обеспечивается повышение максимальной скорости нарастания выходного напряжения за счет форсирования процесса перезаряда паразитных емкостей C_{p1} и C_{p2} в истоковых цепях VT1 и VT2. Цепь нелинейной коррекции (VT5, VT6) рекомендуется выполнять на CMOS транзисторах со встроенным каналом.

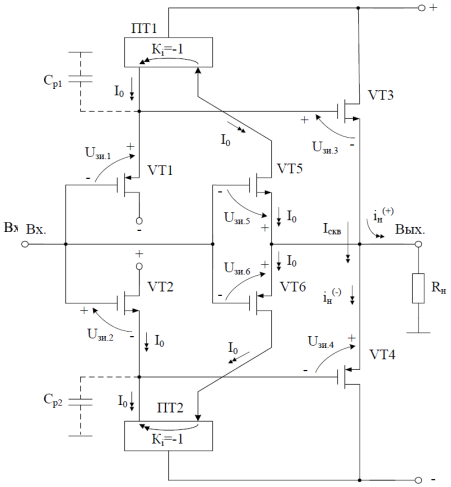


Рис. 2 Выходной каскад CMOS ОУ с цепью нелинейной коррекции на CMOS транзисторах VT5, VT6 со встроенным каналом

На рис. 3 представлена вторая модификация CMOS БУ. Ее особенность состоит в том, что цепи нелинейной коррекции (VT5, VT6 и VT7, VT8) здесь также выполнены на CMOS транзисторах со встроенным каналом. Это позволяет обойтись без источника опорного тока I_1, который ранее использовался в схеме на рис. 1 для установления статического режима.

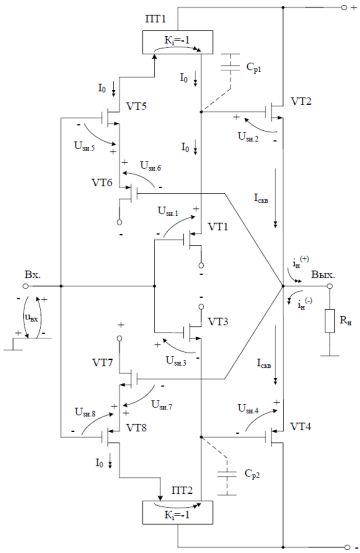


Рис. 3 Буферный усилитель с цепями нелинейной коррекции, выполненными на CMOS транзисторах со встроенным каналом

Результаты компьютерного моделирования

Предлагаемая схема CBJT БУ рис. 1 моделировалась в среде LTSpice на моделях биполярных транзисторов Дворникова О.В. [6-10] для случая, когда ток двухполюсника I_1=100 мкА.

Зависимость выходного напряжения в схеме БУ на рис. 1 от входного напряжения при разных сопротивлениях нагрузки показана на рис. 4.

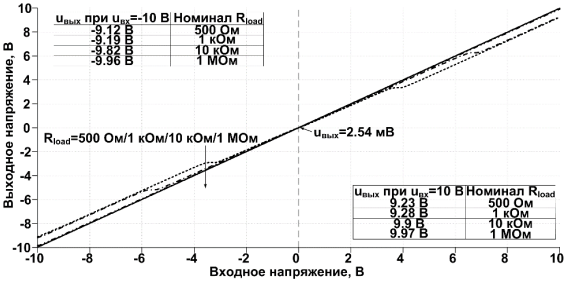


Рис. 4 Амплитудная характеристика CBJT БУ рис.1 в среде LTspice при I_1=100 мкА, R_{load}=500 Ом/1 кОм/10 кОм/1 МОм, Ср1÷Ср2=1 пФ

Анализ результатов моделирования рис. 4 показывает, что рассмотренная схема БУ обеспечивает изменение выходных напряжений в диапазоне от 9,12 до -9,23 В при изменении R_{load} в пределах от 0,5 кОм ÷ 1 МОм.

При этом скорость нарастания переднего фронта выходного напряжений БУ с цепью нелинейной коррекции в (рис. 1) **в 2.62 раза** больше, чем в БУ без НКЦ

($SR^{(+)}$=222,1 В/мкс). Для заднего фронта скорость спада в БУ с НКЦ на рис. 1 **в 2.76 раза** больше, чем в БУ без НКЦ ($SR^{(-)}$=340,13 В/мкс).

Следует отметить, что выигрыш по SR, который дает введение нелинейных корректирующих цепей, зависит от численных значений сопротивления нагрузки, которое влияет на максимально возможные токи транзисторов VT5, VT6 и, как следствие, определяет скорость перезаряда паразитных емкостей C_{p1}, C_{p2}.

Выводы

Рассмотрен схемотехнический метод уменьшения собственного токопотребления, повышения нагрузочной способности, а также быстродействия классических выходных каскадов (буферных усилителей) на комплементарных биполярных транзисторах. Показано, что применение нелинейных корректирующих цепей, сравнивающих входное и выходное напряжения БУ, позволяет уменьшить статические токи транзисторов схемы и увеличить максимально возможные токи в низкоомной нагрузке. Рассмотренная схемотехника рекомендуется для практического использования в операционных усилителях, реализуемых на кремниевых, в т.ч. КНИ, технологических процессах, что обеспечивает расширение диапазона рабочих температур до 200 °C.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 23-79-10069, https://rscf.ru/project/23-79-10069/)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Smith D., Koen M., Witulski A. Evolution of high-speed operational amplifier architectures // IEEE Journal of solid-state circuits, 1994, Vol. 29, No. 10, Pp. 1166-1179. DOI: 10.1109/4.315199.

2. Патент № 5.323.122 USA, МПК H03F 3/26. Rapid slewing unity gain buffer amplifier with boosted parasitic capacitance charging : № 145,820 : заявл. 02.11.1993 : опубл. 24.06.1994 / Bowers D. F. ; заявитель Analog Devices Inc., – 10 с. : ил. – Текст : непосредственный.

3. Патент № 5.963.065 USA, МПК H03F 3/26. Low offset push-pull amplifier : № 08/787,301 : заявл. 24.01.1997 : опубл. 05.10.1999 / Alini R., Bruccoleri M., Cosentino G., Pisati V. ; заявитель : SGS-Thomson Microelectronics S.r.L., Consorzio per la Ricercasulla Microelettronica nel Mezzogiorno – 9 с. : ил. – Текст : непосредственный.

4. Патент № 6.429.744 USA, МПК H03F 3/26. Method for bias rail buffering : № 09/904,806 : заявл. 13.01.2001 : опубл. 06.09.2002 / Murray K. W., Halbert J. M. ; заявитель : Texas Instruments Inc., – 17 с. : ил. – Текст : непосредственный.

5. Biolek D., Biolková V. Implementation of active elements for analog signal processing by diamond transistors // Electronic Devices and Systems EDS' 09 IMAPS CS International Conference, 2009, Pp. 304-309. ISBN: 978-80-214-3933-7.

6. Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A. V. Array Chip MH2XA030 — a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits // IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EexPolytech), 2018, pp. 13-17. DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564415.

7. Проектирование низкотемпературных и радиационностойких аналоговых микросхем для обработки сигналов датчиков : монография / Н.Н. Прокопенко [и др.] ; М.: СОЛОН-Пресс, 2021. – 200 с. – Библиогр.: с. 198–200. – ISBN 978-5-91359-443-3. – Текст : непосредственный.

8. O. V. Dvornikov, A. V. Bugakova, N. N. Prokopenko, V. L. Dziatlau and I. V. Pakhomov, The microcircuits MH2XA010-02/03 for signal processing of optoelectronic sensors // 2017 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, 2017, pp. 396-402. DOI: 10.1109/EDM.2017.7981781.

9. Схемотехника быстродействующих операционных усилителей : монография / Н.Н. Прокопенко [и др.] ; М.: СОЛОН-Пресс, 2023. – 248 с. – Библиогр.: с. 232–248. – ISBN 978-5-91359-578-2. – Текст : непосредственный.

10. Элементная база радиационно-стойких информационно-измерительных систем монография / Н.Н. Прокопенко, О.В. Дворников, С.Г. Крутчинский; под общ. ред. д.т.н., проф. Н.Н. Прокопенко, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федерал. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования "Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса" (ФГБОУ ВПО "ЮРГУЭС"). — Шахты : ФГБОУ ВПО "Юргуэс", 2011. — 206, с. ил.; 21. — ISBN 978-5-93834-700-7. – Текст : непосредственный.

Автор: Жук Алексей Андреевич, ассистент кафедры «Информационные системы и радиотехника» Донского государственного технического университета, Россия, город Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000, телефон: +79185880301, email: alexey.zhuk96@mail.ru.

Автор: Клейменкин Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры «Информационные системы и радиотехника» Донского государственного технического университета, Россия, город Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000, телефон: +79281970049, email: k-dima-01@mail.ru.

Author: Zhuk Alexey Andreevich**,** assistant of Department of Information Systems and Radio Engineering of Don State Technical University, Russia, Rostov-on-Don, 1 Gagarin square, 344000, phone: +79185880301, email: alexey.zhuk96@mail.ru.

Author: Kleimenkin Dmitry Vladimirovich**,** post-graduate student of Department of Information Systems and Radio Engineering of Don State Technical University, Russia, Rostov-on-Don, 1 Gagarin square, 344000, phone: +79281970049, email: k-dima-01@mail.ru.

УДК 537.876

Пленингер Максимилиан, Балакирев Сергей Вячеславович,
Солодовник Максим Сергеевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1.3 МКМ В ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ С КОНФИГУРАЦИЕЙ ВОЛНОВОД-МИКРОРЕЗОНАТОР

В данной работе представлены результаты моделирования взаимодействия света с веществом в фотонных кристаллах на основе GaAs с различными микродисковыми и гексагональными нанополостями, а также конфигурациями их сопряжения, работающих на длине волны 1,3 мкм. Исследовано влияние геометрических параметров структуры фотонного кристалла на распределение напряженности электрического поля в различных элементах. Также проанализированы гексагональные моды в нанополостях с различными размерами и расстояниями от волновода. Приведены зависимости интегральной напряженности электрического поля в различных областях структуры от формы и радиуса нанополостей, а также позиции преднамеренно введенного дефекта.

Ключевые слова: фотонный кристалл, волновод, гексагональная полость, длина волны 1.3 мкм, GaAs.

Maximilian Pleninger, Sergey Vyacheslavovich Balakirev, Maxim Sergeyevich Solodovnik

SIMULATION OF THE PROPAGATION OF LIGHT WITH A WAVELENGTH OF 1.3 μm IN PHOTONIC CRYSTALS WITH A WAVEGUIDE-MICRORESONATOR CONFIGURATION

This paper presents the results of modeling the interaction of light with matter in GaAs-based photonic crystals with various microdisc and hexagonal nanocavities, as well as their coupling configurations operating at a wavelength of 1.3 μm. The influence of the geometric parameters of the photonic crystal structure on the distribution of electric field strength in various elements is investigated. Hexagonal modes in nanocavities with different sizes and distances from the waveguide are also analyzed. Depending on the integrated electrical field strength, various regions of the structure are presented from the radius of nanocavities and additional defects.

Keywords: photonic crystal, waveguide, hexapole nanocavity, wavelength 1.3 μm, GaAs.

Введение

Новый класс оптических материалов, известных как фотонные кристаллы, характеризуется периодическим изменением диэлектрической проницаемости в пространстве. Период этих изменений сопоставим с длиной волны света, что приводит к формированию фотонной запрещенной зоны в спектре электромагнитных состояний материала [1]. Благодаря своим уникальным

свойствам, фотонные кристаллы рассматриваются как перспективная основа для создания оптических интегральных схем большого масштаба.

Фотонная запрещенная зона, полная или частичная, представляет собой диапазон частот, в котором свет, распространяющийся в определенных направлениях внутри кристалла, подвергается экспоненциальному затуханию. Это приводит к полному отражению света, падающего на структуру. Формирование полной фотонной запрещенной зоны обусловлено перекрытием брэгговских стоп-зон во всех возможных направлениях распространения света [2].

Фотонные кристаллы обладают широким спектром потенциальных применений как в практической, так и в теоретической областях [3–8]. Особое внимание уделяется их использованию в оптических интегральных схемах, включая модуляцию световых волн и создание логических элементов для фотонных интегральных схем.

В рамках данной работы было проведено моделирование процессов взаимодействия света и вещества в фотонных кристаллах, включающих в себя волноводы, гексагональные нанорезонаторы и различные типы связи между ними. Базовая структура фотонного кристалла характеризуется фиксированными геометрическими параметрами: радиус воздушных отверстий составляет 209 нм, а период решетки – 520 нм. Для анализа взаимодействий света с веществом геометрия волновода и нанорезонатора была модифицирована. Выбор целевой длины волны обусловлен ее расположением во втором окне прозрачности оптического волокна, которому присущи слабое затухание в оптическом волокне и нулевая дисперсия [9]. Кроме того, на этой длине волны происходит излучение квантовых точек InGaAs, отличающихся развитой технологией изготовления [10].

Описание модели

Исследование проводилось для двумерного фотонного кристалла с гексагональной решеткой воздушных отверстий в матрице GaAs. Радиус воздушных отверстий и расстояние между ними были выбраны равными 209 и 520 нм таким образом, чтобы свет с длиной волны 1,3 мкм попадал в полную запрещенную зону фотонного кристалла, как для TE- (поперечных электрических), так и для TM- (поперечных магнитных) мод. Удаление отверстий в определенных местах фотонного кристалла позволило создать различные конфигурации резонаторов в гексапольных и круглых полостях, связанных с волноводами. Для исследования процессов распространения TE-волн через фотонный кристалл используется скалярное уравнение для поперечной составляющей электрического поля (ЭП).

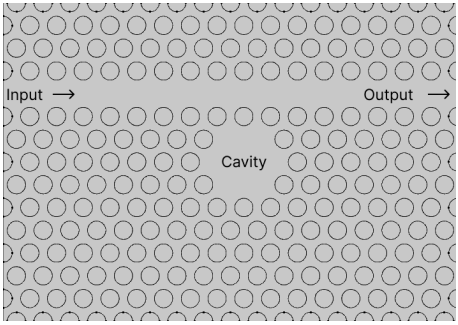


Рис. 1 Пример структуры фотонного кристалла с гексагональной полостью и волноводом, используемой в моделировании.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 демонстрируются результаты моделирования структуры, включающей волновод и гексагональую полость, расстояние между которыми варьируется дискретно. Шаг изменения расстояния соответствует одному ряду воздушных отверстий. Полученные данные представлены для двух значений диаметра гексагональной полости: на рисунке 1 (а-в) диаметр составляет 1,65 нм, а на рисунке 1 (г-е) – 2,69 нм.

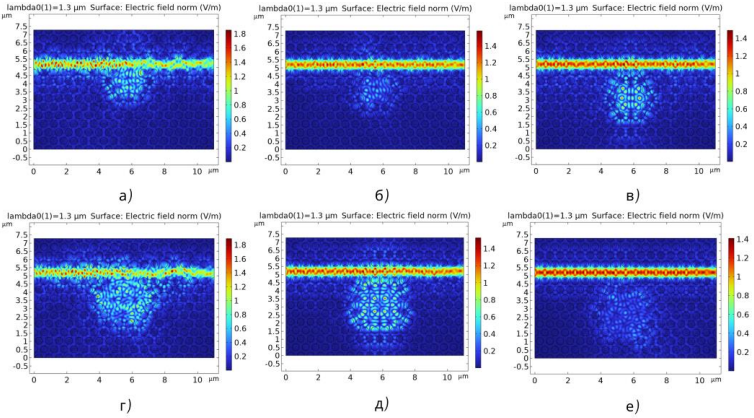


Рис. 2 Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности электрического поля в структуре волновод-микрорезонатор

Впоследствии было проведено изучение зависимости интеграла от функции, описывающей зависимость напряженности ЭП от координаты вдоль волновода (интегральной напряженности ЭП), от количества рядов воздушных отверстий, разделяющих волновод и гексагональную полость. Измерения осуществлялись вдоль волновода, полученные результаты отражены на рисунке 3.

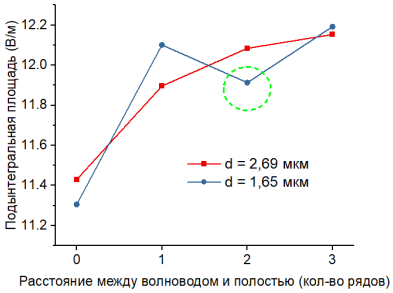


Рис. 3 Зависимость интегральной напряженности ЭП вдоль волновода от количества рядов воздушных отверстий до гексагональной полости

Анализ полученных данных позволяет заключить, что оптимальная конфигурация структуры достигается при расстоянии между волноводом и гексагональной полостью, равном двум рядам воздушных отверстий. Наличие провала на графике свидетельствует о передаче части излучения из волновода в гексагональную полость.

Затем было исследовано влияние дефекта, введенного в волновод, на величину интегральной напряженности ЭП вдоль волновода и в гексагональной полости. Для повышения эффективности передачи излучения в гексагональную полость в структуру был добавлен дефект в области волновода. Варьирование радиуса дефекта от 261,2 нм до 139,3 нм привело к соответствующим изменениям в картах распределения напряженности электрического поля, представленным на рисунках 4-5.

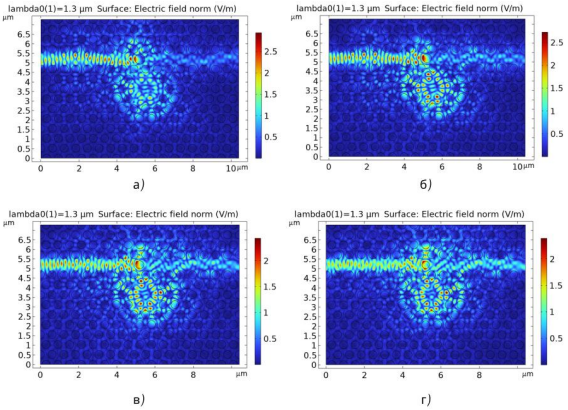


Рис. 4 Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности электрического поля в структуре волновод-микрорезонатор с дефектом с радиусом 261,2 нм (а), 232,2 нм (б), 290 нм (в), 190 нм (г)

Результаты с радиусом дефекта, варьирующимся от 174,1 до 139,3 нм представлены ниже на рисунке 5.

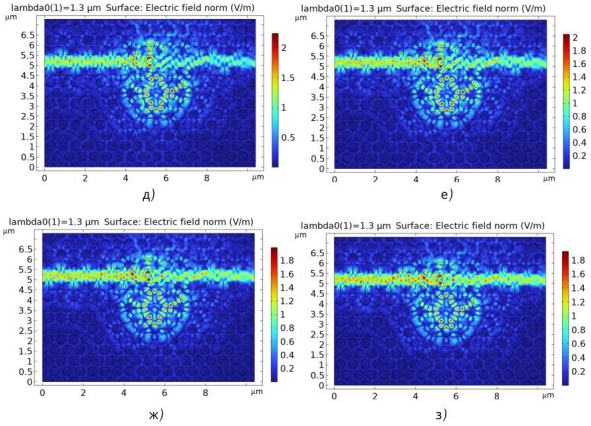


Рис.5 Полученное в результате проведенного моделирования распределение напряженности электрического поля в структуре волновод-микрорезонатор с дефектом с радиусом 174,1 нм (д), 160,7 нм (е), 149,2 (ж), 139,3 нм (з)

В продолжение анализа, аналогично исследованию структуры без дефектов, было выполнено изучение зависимости интегральной напряженности ЭП вдоль волновода от радиуса дефекта, внедренного в волноводную структуру. Измерения проводились как вдоль направления распространения волны в волноводе (рис. 6(а)), так и непосредственно в гексагональной резонаторной полости (рис. 6(б)).

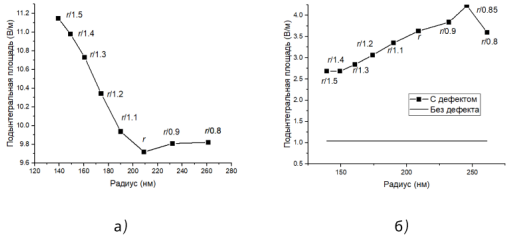


Рис. 6 Зависимость интегральной напряженности ЭП вдоль волновода от радиуса дефекта в волноводе

На рисунке 6(б) представлена горизонтальная линия, отображающая величину интегральной напряженности ЭП в гексагональной полости, полученную для волновода без дефекта.

Анализ данных, представленных на рисунке 5(а), показывает, что с увеличением радиуса дефекта наблюдается уменьшение интегральной напряженности ЭП до тех пор, пока радиус не достигает значения 209 нм. Данный эффект указывает на то, что при указанном радиусе дефекта максимальная доля излучения из волновода переходит в гексагональную область, что подтверждается характерным снижением интенсивности вдоль волновода. На рисунке 6(б) видно, что наибольшая интегральная площадь в гексагональной области наблюдается в диапазоне радиусов дефекта от 290 до 245,8 нм. Это позволяет сделать вывод об оптимальности применения данного диапазона радиусов дефектов в рассматриваемой конфигурации.

Заключение

Представленная работа посвящена исследованию результатов численного моделирования взаимодействия электромагнитного излучения с фотонными кристаллами на основе GaAs с микродисковыми и гексагональными нанорезонаторами, а также различными вариантами их сопряжения, функционирующими в диапазоне 1,3 мкм. Показано, что оптимальной конфигурацией, обеспечивающей эффективный ввод излучения в гексагональный резонатор, является структура с дефектом, радиус которого лежит в диапазоне от 209 нм до 245,8 нм. В указанной конфигурации наблюдается значительная локализация электромагнитного поля в резонаторе, что подтверждается как анализом интегральной напряженности ЭП. Полученные результаты могут быть применены при разработке компактных оптических устройств, таких как оптические модуляторы и переключатели.

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-10313, https://rscf.ru/ru/project/23-79-10313/) в Южном федеральном университете и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации; государственное задание в сфере научной деятельности № FENW-2025-0004).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yablonovitch E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 58, № 20. P. 2059–2062.
2. Dyachenko P.N., Miklyaev Y. V., Dmitrienko V.E. Three-dimensional photonic quasicrystal with a complete band gap // JETP Lett. 2007. Vol. 86, № 4. P. 240–243.
3. Tamer A. Moniem. All-optical XNOR gate based on 2D photonic-crystal ring resonators // Quantum Electron. 2017. Vol. 47, № 2. P. 169–172.
4. Xiong Y. et al. Photonic Crystal Circular Defect (CirD) Laser // Photonics. 2019. Vol. 6, № 2. P. 54.
5. Zheltikov A.M. Nonlinear optics of microstructure fibers // Uspekhi Fiz. Nauk. 2004. Vol. 174, № 1. P. 73.
6. Sychov M.D. et al. Substantiation Study of Using Immobilized Cytostatics in Management of Tumors with Peritoneal Canceromatosis // Vestn. Exp. Clin.

Surg. 2015. Vol. 8, № 1. P. 82–86.
7. Hassan S., Chack D., Pavesi L. High extinction ratio thermo-optic based reconfigurable optical logic gates for programmable PICs // AIP Adv. 2022. Vol. 12, № 5.
8. Olyaee S., Naraghi A., Ahmadi V. High sensitivity evanescent-field gas sensor based on modified photonic crystal fiber for gas condensate and air pollution monitoring // Optik (Stuttg). 2014. Vol. 125, № 1. P. 596–600.
9. Brès C.-S. et al. Supercontinuum in integrated photonics: generation, applications, challenges, and perspectives // Nanophotonics. 2023. Vol. 12, № 7. P. 1199–1244.
10. García de Arquer F.P. et al. Semiconductor quantum dots: Technological progress and future challenges // Science. 2021. Vol. 373, № 6555. P. eaaz8541.

Авторы:
Пленингер Максимилиан, лаборант-исследователь Лаборатории эпитаксиальных технологий Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, ул. Шевченко д. 2, 347922, телефон: +7 9897471548, email: pleninger@sfedu.ru
Балакирев Сергей Вячеславович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории эпитаксиальных технологий Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: sbalakirev@sfedu.ru
Солодовник Максим Сергеевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории эпитаксиальных технологий Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Шевченко 2, 347922, телефон: +7 (863) 437-16-11, email: solodovnikms@sfedu.ru

Authors:
Maximilian Pleninger, research technician, Laboratory of Epitaxial Technologies of the Southern Federal University, Russia, Taganrog, Shevchenko street 2 , 347922, phone: +79897471548, email: pleninger@sfedu.ru
Sergey Vyacheslavovich Balakirev, candidate of technical sciences, leading researcher, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: sbalakirev@sfedu.ru
Maxim Sergeyevich Solodovnik, candidate of technical sciences, leading researcher, 347922, Russia, Taganrog, 2 Shevchenko Street, phone: +7 (863) 437-16-11, email: solodovnikms@sfedu.ru

УДК: 53.096

Калмыков Рустам Мухамедович

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе проведено исследование термоэлектрического эффекта Пельтье, а также произведен расчет с помощью программы Mathcad зависимости мощности P_c, отбираемой у холодного резервуара, от электрического тока, протекающего через термопару. Как показали результаты исследований, в случае, когда $I < 0$, то тепловой поток будет направлен в сторону холодного резервуара, а при $I = 0$ эффект Пельтье будет полностью отсутствовать и тепловой поток, обусловленный теплопроводностью, все также будет направлен в ту же сторону.

Ключевые слова: элемент Пельтье, термоэлектрическое охлаждение, мощность, коэффициент термоЭДС.

Rustam Muhamedovich Kalmykov

INVESTIGATION OF THE PELTIER THERMOELECTRIC ELEMENT USING SIMULATION TOOLS

The study of the thermoelectric Peltier effect was carried out, and the dependence of the Pc power taken from a cold tank on the electric current flowing through a thermocouple was calculated using the Mathcad program. As the research results have shown, in the case when $I < 0$, the heat flow will be directed towards the cold tank, and at $I = 0$, the Peltier effect will be completely absent and the heat flow due to thermal conductivity will still be directed in the same direction.

Keywords: Peltier element, thermoelectric cooling, power, thermal efficiency coefficient.

Введение

Современные радиоэлектронные компоненты обладают малыми габаритами и высокими плотностями выделяющейся в них тепловой энергией, что приводит к необходимости их охлаждения. Многие приборы для обеспечения требуемых характеристик нуждаются в существенном понижении их температуры относительно температуры среды [1-5]. При этом важнейшие достоинства термоэлектрических охладителей: компактность, малая масса, возможность дозирования холода в сколь угодно малых количествах, независимость работы по ориентации устройства в пространстве, сохранение работоспособности при больших перегрузках и невесомости и др. - часто делают их единственно приемлемыми источниками холода.

Показано, что при температурах охлаждения 260...300 К и тепловых нагрузках до 30...40 Вт термоэлектрические охладители оказываются вне конкуренции главным образом ввиду отсутствия современных холодильных машин со столь малой холодопроизводительностью. При больших тепловых нагрузках существующие машины работают более экономично, чем термоэлектрические устройства, однако при холодопроизводительности до 500 Вт сказывается другое преимущество термоэлектрических охладителей - относительно малые габариты. Поэтому вопрос выбора способа охлаждения решается в зависимости от конкретных условий применения.

Получение более низких температур (250...150 К) термоэлектрическим методом возможно путем каскадного включения охладителей. И здесь можно говорить об известных преимуществах термоэлектрическим охлаждения перед машинным [6,7]. Холодильные машины с холодопроизводительностью порядка единиц и долей ватта практически отсутствуют. При больших значениях холодопроизводительности каскадные термоэлектрические устройства, проигрывая в экономичности, сохраняют преимущество малогабаритности.

Еще одной возможностью использования термоэлектрических охладителей является интенсификация теплообмена. Отвод тепла от разного рода тепловыделяющих приборов осуществляется обычно с помощью теплоотводов-радиаторов. Если разность температур прибора и среды невелика, размеры радиатора получаются слишком большими. Установка термоэлектрической батареи между прибором и радиатором позволяет значительно повысить температуру последнего, не меняя температуры прибора. При этом размеры радиатора существенно снижаются.

Основные направления развития термоэлектрических охлаждающих устройств состоят в следующем:

1. Усовершенствование технологии, направленное в первую очередь на улучшение электрических и массогабаритных характеристик систем охлаждения на основе термоэлектрических устройств, а также на повышение их надежности и стабильности.

2. Разработка эффективных конструкций каскадных термоэлектрических охлаждающих устройств, позволяющих с одной стороны сократить потребляемую мощность, а с другой получить понижение температуры, не достижимое в однокаскадном варианте.

3. Автоматизация процессов проектирования на всех этапах: логического, схемотехнического, топологического, проектирование коммутации, измерений и испытаний.

В связи с этим, целью настоящей работы являлось исследование особенностей термоэлектрических охлаждающих устройств, основанных на термоэлектрическом эффекте Пельтье.

Основная часть

Работа классического термоэлектрического элемента, работающего в режиме генерации электрической энергии, состоит из двух ветвей, которые электрически с помощью коммутационных элементов соединены

последовательно. Ветви изготавливаются из полупроводникового термоэлектрического материала различного типа проводимости: p- и n-типа проводимости. Наличие ветвей разных типов проводимости дает возможность складывать их термо-ЭДС с помощью коммутационных элементов, которые непосредственно припаиваются к ветвям термоэлемента. К коммутационным элементам на холодном спае термоэлемента подсоединяется нагрузка R.

Если к горячему контакту термоэлемента подвести некоторый поток теплоты $Q_г$ при температуре $T_г$, а от холодного спая отвести некоторый поток тепла $Q_х$ при температуре $T_х$, то под действием перепада температур на спаях термоэлемента ΔT, согласно эффекту Зеебека, возникнет термо-ЭДС, которая зависит от температуры следующим соотношением:

$$E_{ТЭ} = (\alpha_p + \alpha_n)\Delta T,$$

где α_p и α_n – абсолютные величины коэффициентов термоЭДС ветвей p- и n-типов соответственно.

Под действием термоЭДС E по замкнутой цепи термоэлемента, включающей полезную нагрузку R, потечет электрический ток I.

Внутреннее сопротивление термоэлемента $r_{тэ}$ состоит из сопротивлений ветвей соответственно r_p и r_n, и сопротивления коммутационного элемента $r_к$:

$$r_{тэ} = r_p + r_n + r_к.$$

Можно представить сопротивление коммутационного элемента в виде относительной величины

$$k = \frac{r_к}{r_p + r_n},$$

а величины сопротивлений ветвей представим через их геометрические размеры и удельные сопротивления термоэлектрических материалов.

Следовательно, получаем:

$$r_{тэ} = \left(\rho_p \frac{l}{S_p} + \rho_n \frac{l}{S_n}\right)(1 + m),$$

где S_p и S_n – площади поперечных сечений ветвей соответственно p- и n-типов; ρ_p и ρ_n – удельные сопротивления ветвей термоэлемента соответственно p- и n-типов; l – длина ветвей.

Указанные выше характеристики позволяют вычислить все электрические параметры термоэлектрических генераторов, а также его КПД в случае, если известны его размеры, свойства материалов, а также количество теплоты, подводимой к его спаям.

Предполагая следующие параметры термоэлектрического материала: теплопроводность 1,5 Вт/(м·К), удельное электрическое сопротивление – $10{,}65 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, теплоемкость – 123 Дж/(кг·К), коэффициент термоЭДС – $0{,}2 \cdot 10^{-3}$ В/К, а также размеры ветвей термоэлементов – 2-2-2 мм, можно определить некоторые характеристики термоэлектрического модуля Пельтье. На рисунке 1 представлена зависимость термоЭДС от перепада температур между спаями термоэлектрического модуля при различных коэффициентах теплообмена с окружающей средой.

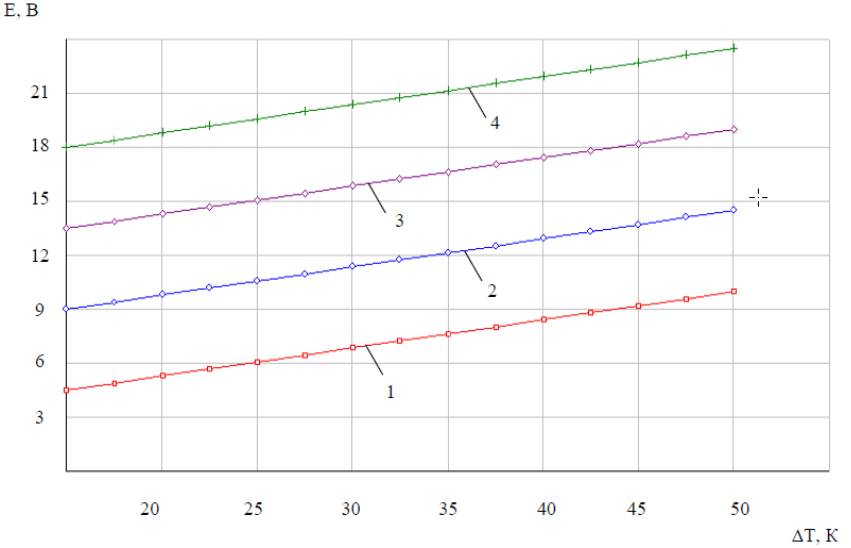


Рис. 1. Зависимость термоЭДС от перепада температур между спаями ТЭГ при различных коэффициентах теплообмена с окружающей средой: 1 – $\alpha_{ср}$ = 1,5 *Вт/м²·К, 2 –* $\alpha_{ср}$ = *2,5 Вт/м²·К, 3 –* $\alpha_{ср}$ = 3,5 Вт/м²·К, 4 – $\alpha_{ср}$ = 4,5 Вт/м²·К

Как показывают исследования, эффект Пельтье обратим, т.к направление теплового потока зависит от направления, протекающего через термопару тока. Тепловой поток может передаваться от холодной стороны термопары к горячей и таким образом, термопара может работать как холодильник или тепловой насос.

Рассмотрим термоэлемент, для которого известны коэффициент термоЭДС, сопротивление и теплопроводность. Эти значения берем такие же, что и для выше рассмотренного примера: теплопроводность 1,5 Вт/(м·К), электрическое сопротивление – 4,5 Ом, теплоемкость – 123 Дж/(кг·К), коэффициент термоЭДС – $0{,}2 \cdot 10^{-3}$ В/К. Пусть тепловой поток направлен от стенки с температурой Тс = 259 К к стенке с температурой Тн = 313 К. Тогда в этом случае ΔT = 54 К.

Пусть Pc – тепловая мощность, отнимаемая от холодного резервуара. Тогда получаем выражение:

$$P_C = k \cdot \Delta T + \alpha \cdot T_C \cdot I - \frac{1}{2} \cdot R \cdot I^2,$$

где k – коэффициент теплопроводности, α – коэффициент термоЭДС.

С учетом исходных значений получим выражение:

$$P_C = 81 + 5{,}18 \cdot I - 2{,}25 \cdot I^2.$$

Количество электрической энергии, требуемой для осуществления данного процесса, оценивается по формуле:

$$Q = \alpha \cdot \Delta T \cdot I + R \cdot I^2.$$

Расчет зависимости мощности P_C, отбираемой у холодного резервуара, от электрического тока, протекающего через термопару, проводился с помощью программы Mathcad. Результаты расчета представлены на рисунке 2.

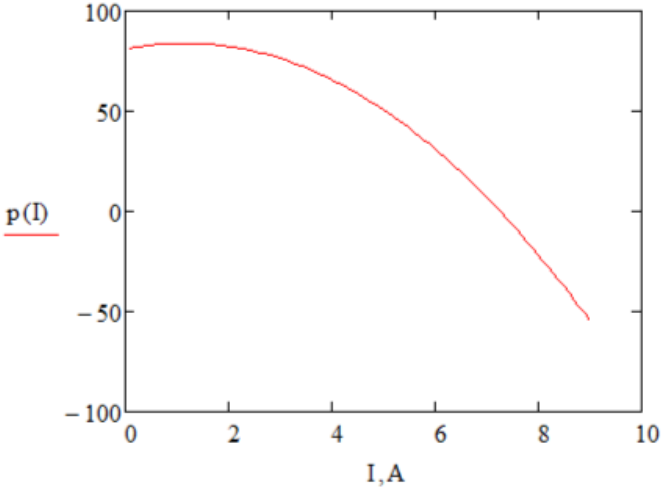


Рис. 2. Зависимость мощности P_C отбираемой у холодного резервуара, от электрического тока

Как показывают результаты исследования в случае, если $I < 0$, то тепловой поток будет направлен в сторону холодного резервуара. При $I = 0$ эффект Пельтье будет отсутствовать и тепловой поток, обусловленный теплопроводностью, по-прежнему будет направлен в ту же сторону. При дальнейшем увеличении тока вследствие эффекта Пельтье тепловой поток начнет уменьшаться и в какой-то момент тепловой поток поменяет направление, т.е. тепло будет передаваться от холодной стенки к горячей.

Сначала количество тепла, передаваемого в этом направлении, будет расти с ростом тока, но затем увеличение количества тепла, выделяемого в результате джоулева нагрева, приведет к подавлению эффекта Пельтье и соответствующему уменьшению теплового потока, направленного от холодной стенки к горячей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Равич, Ю.И. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe и PbS / Ю.И. Равич, Б.А. Ефимова, И.А. Смирнов. – М.: Наука, 1968. – 382с.
2. Патли, Е. Материалы, используемые в полупроводниковых приборах Е. Патли. – М.: Мир, 1968. – 97с.
3. С.П. Зимин, Е.С. Горлачев. Наноструктурированные халькогениды свинца. – Я.: Ярославский государственный университет, 2011г., 232с.
4. Дмитриев, А.В. Современные тенденции развития физики термоэлектрических материалов / А.В. Дмитриев, И.П. Звягин // Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180, №8. – С. 821-837.
5. Сомкин М.Н., Водолагин В.Ю. Определение средней температуры ветви охлаждаемого термоэлемента в различных режимах работы. – Вопросы радиоэлектроники, сер. ТРТО, 1981. №2, с. 92-94.
6. Стильбанс Л.С. Физика полупроводников. – М.: Сов. Радио, 1967. 452с.
7. Семенюк В.А. Возможности повышения эффективности термоэлектрического охлаждения при использовании неоднородных термоэлементов. – Теплофизика и теплотехника, 1978. Вып. 35, с. 80-84.

Автор: Рустам Мухамедович Калмыков, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники и цифровых информационных технологий ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова», 360004, Россия, Кабардино-Балкарская республика, город Нальчик, улица Чернышевского 173, телефон: +7 (928) 912-19-20, e-mail: kalmykov.rustam@yandex.ru

Author: Rustam Muhamedovich Kalmykov, Candidate of Physical and Mathematical Science, Docent of the Department of Electronics and Digital Information Technolodies of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov”, 360004, Russia, Kabardino-Balkaria, Nalchik city, Chernyshevsky street, phone: +7 (928) 912-19-20, e-mail: kalmykov.rustam@yandex.ru

УДК 536.21

Завьялов Дмитрий Викторович, Конченков Владимир Игоревич,
Полянский Евгений Олегович, Шеин Данила Валерьевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ГРАФЕН-ФОСФОРЕН-ГРАФЕН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛОВЫХ ПОЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Выполнено моделирование гетероструктуры графен-фосфорен-графен методом квантовой молекулярной динамики Кара-Парринелло, на основе которого обучена нейронная сеть пакета DeePMD, предсказывающая силовое поле в образце в ходе моделирования методом классической молекулярной динамики. Моделирование методом классической молекулярной динамики показало пригодность полученного силового поля для исследования рассматриваемой гетероструктуры при низких температурах.

AIMD, Quantum ESPRESSO, LAMMPS, DeePMD, потенциал межатомного взаимодействия, полносвязные нейронные сети.

Zav'yalov Dmitry Viktorovich, Konchenkov Vladimir Igorevich,
Polyansky Eugeniy Olegovich, Shein Danila Valeryevich

MODELING OF GRAPHENE-PHOSPHORENE-GRAPHENE HETEROSTRUCTURE USING FORCE FIELDS OBTAINED BY MACHINE LEARNING METHODS

The graphene-phosphorene-graphene heterostructure was modeled using the Car-Parrinello quantum molecular dynamics method, which was used to train a DeePMD neural network that predicts the force field in a sample during classical molecular dynamics modeling. Classical molecular dynamics modeling has shown the suitability of the obtained force field for studying the heterostructure under consideration at low temperatures.

AIMD, Quantum ESPRESSO, LAMMPS, DeePMD, the potential of interatomic interaction, fully connected feed-forward neural network.

Введение

Вертикальные ван-дер-ваальсовы гетероструктуры, примером которых является гетероструктура, состоящая из двух листов графена и листа черного фосфорена, вложенного между ними (G-Ph-G-структура, рис. 1), в последнее время исследуются достаточно широко. В [1, 2] G-Ph-G-структуры исследуются как основа перспективных аккумуляторов. В [1-3] для исследования электронных состояний в таких гетероструктурах используются методы теории функционала плотности и *ab initio* молекулярной динамики (AIMD). В [4, 5] используется классическая молекулярная динамика с потенциалами, задаваемыми формулами и подобранными для конкретных молекулярных структур и конфигураций: потенциал Стиллингера-Вебера – для описания взаимодействий в листе фосфорена, потенциал AIREBO – для описания

взаимодействий в листе графена, потенциал Леннард-Джонса – для описания взаимодействия между слоями фосфорена и графена. Основным недостатком AIMD является довольно жесткие ограничения на размеры исследуемых систем, а недостатком моделирования методами классической молекулярной динамики – сложность подбора потенциала межатомного взаимодействия.

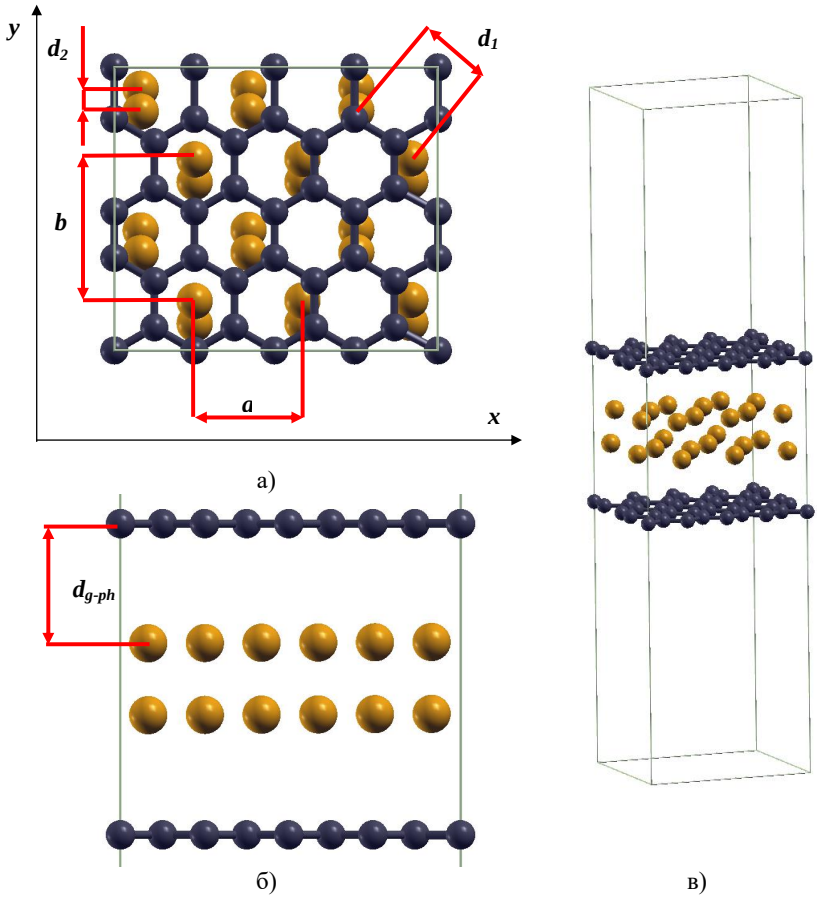


Рис. 1 Гетероструктура графен-фосфорен-графен: а) вид сверху: $a = 3.314$ Å, $b = 4.376$ Å, $d_1 = 2.224$ Å, $d_2 = 2.244$ Å; *б) вид сбоку: расстояние между слоем графена и слоем фосфорена* $d_{g-ph} = 3.5$ Å*; в) моделируемая в Quantum ESPRESSO элементарная ячейка*

В последние 7-8 лет развивается подход, когда потенциал межатомного взаимодействия, используемый в ходе моделирования методом классической

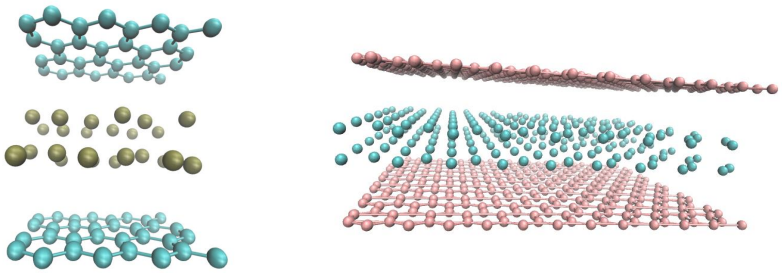
молекулярной динамики, вычисляется нейронной сетью, обученной на данных квантовохимического расчета (см., например, [6, 7]). В [6] исследована теплопроводность черного фосфорена, результаты коррелируют со значениями, полученными из эксперимента. В [4, 5] показано, что фосфорен, помещенный между двумя слоями графена, на модели показывает значительно более высокую термостабильность, чем отдельно стоящий образец.

Описание моделирования

Целью настоящей работы является исследование термостабильности G-Ph-G-структуры в ходе моделирования методом классической молекулярной динамики с использованием потенциала межатомного взаимодействия, полученного методами глубокого обучения. В работе используется пакет DeePMD, формирующий файл нейросетевой модели в формате стилевого файла силового поля пакета LAMMPS. На рис. 1 изображена исследуемая гетероструктура и основные параметры кристаллической решетки черного фосфорена согласно экспериментальным значениям, приведенным в [8, 9]. В [2] показано, что взятие именно такого количества атомов и относительной конфигурации листов фосфорена и графена дает наименьшее рассогласование постоянный решетки для моделируемой сверхячейки. Расстояние d_{ph-g} между слоями графена и фосфорена было взято согласно результатам исследования наиболее энергетически выгодного взаимного расположения рассматриваемых материалов, выполненного в [3]: $d_{ph-g} = 3.5$ Å. Для исследуемой гетероструктуры выполнялась процедура оптимизации положения атомов (расчет relax в программе pw.x пакета Quantum ESPRESSO [10]), оптимизация положения элементарной ячейки (расчет vc-relax в программе pw.x), затем собственно выполнялась молекулярная динамика Кара-Парринелло при помощи программы cp.x, входящей в пакет Quantum ESPRESSO. Первые 1000 шагов моделировалась только динамика электронов, затем в течение 10000 шагов моделировалась также динамика ионов, далее выполнена рандомизация положения ионов и снова моделирование динамики электронов и ионов в течение 1000 шагов. На указанных этапах для ионной динамики использовался алгоритм damp молекулярной динамики, ансамбль NVE. На следующих двух этапах (по 100000 шагов) использовался алгоритм verle молекулярной динамики, ансамбль NVT, температура устанавливалась равной 273 K. В течение последних 100000 шагов выполнялась запись положения атомов, сил, действующих на каждый из атомов, энергии всей системы на каждом временном шаге. Данные с последнего этапа моделирования вошли в обучающую выборку. На рис. 2а показан кадр моделирования методом AIMD Кара-Парринелло. Визуально кристаллическая структура материалов не нарушена.

На основе полученных данных AIMD была обучена нейронная сеть пакета DeePMD. Настройки самой сети и режима обучения взяты базовые. Для проверки адекватности модели силового поля рассмотрена гетероструктура, содержащая 3x3 сверхячеек (792 атома) структуры, моделировавшейся

методами AIMD (рис. 2б). Моделирование методом классической молекулярной динамики в пакете LAMMPS с использованием силового поля, вычисляемого нейронной сетью пакета DeePMD проводилось в два этапа: вначале использовался ансамбль NVE, затем с использованием термостата Берендсена осуществлялось приведение исследуемой структуры к термодинамическому равновесию с постепенным ростом температуры термостата вплоть до комнатной. Моделирование показало, что сформированное силовое поле удерживает кристаллическую структуру рассматриваемых материалов только при низких температурах (около 10 К).



а) б)

Рис. 2 Визуализация моделирования гетероструктуры графен-фосфорен-графен в программе VMD: а) AIMD Кара-Парринелло структуры, состоящей из 88 атомов (64 атома углерода и 24 атома кремния) в программе ср.х пакета Quantum ESPRESSO; б) классическая молекулярная динамика структуры, состоящей из 792 атомов, в пакете LAMMPS с использованием силового поля, вычисляемого нейронной сетью пакета DeePMD, обученной на данных AIMD

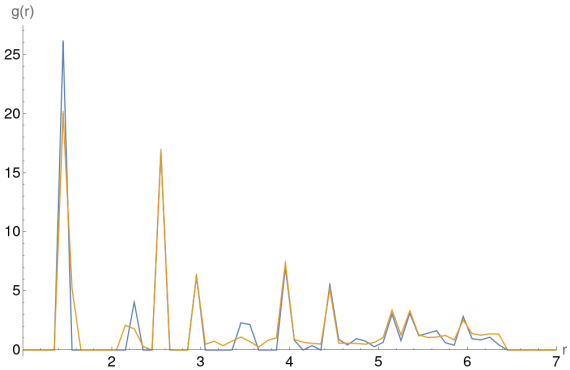


*Рис. 3 Радиальная функция g(r) распределения попарных расстояний между атомами (radial pair distribution function) для гетероструктуры графен-фосфорен-графен при моделировании методом классической молекулярной динамики, кадры с номерами 1 и 5000; r – расстояние между атомами (*Å)

На рис. 3 показаны графики радиальной функции распределения попарных расстояний между атомами, по которой можно судить о сохранении (или несохранении) кристаллической структуры материала, в начале моделирования и на шаге с номером 5000, что примерно соответствует температуре 10 К. Видно, что положения и величина максимумов хорошо коррелируют. Далее корреляция значительно ухудшается.

Выводы

В рамках работы проведено моделирование методами квантовой и классической молекулярной динамики гетероструктуры графен-фосфорен-графен. Потенциал силового поля, полученный в результате машинного обучения, в первом приближении показал свою применимость для рассматриваемой структуры, однако расчеты требуют существенных уточнений. Во-первых, моделирование методом AIMD Кара-Парринелло проводилось без явного учета ван-дер-ваальсова характера взаимодействия между слоями графена и фосфорена, что, как отмечается в [1-3], может приводить к систематическим ошибкам. Во-вторых, использовались базовые настройки пакета DeePMD, поэтому получен неоптимальный вариант нейросетевой модели потенциала межатомного взаимодействия. В [7] отмечается, что подбор методики обучения сети эффективнее осуществлять с использованием программы DP-GEN, входящей в состав пакета DeePMD, позволяющей автоматизировать подбор репрезентативной обучающей выборки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Z. Mansouri et al. Graphene/Phosphorene nano-heterostructure as a potential anode material for (K/Na)-ion batteries: Insight from DFT and AIMD // Computational Material Science. – 2022. – V. 202. – 110936.

2. B. Ozdemir. Black phosphorus and phosphorene/graphene heterostructure as alkali metal (Li, Na, and K) ion battery // arXiv:2007.10308v1 (2020).

3. J.E. Padilha, A. Fazzio, A.J.R. da Silva. Van der Waals heterostructure of phosphorene and graphene: tuning the Schottky barrier and doping by electrostatic gating // Physical Review Letters. - 2015. – V. 114. – 066803.

4. Q. Pei, X. Zhang, Z. Ding, Y. Zhang, Y. Zhang. Thermal stability and thermal conductivity of phosphorene in phosphorene/graphene van der Waals heterostructures // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2017. – V. 19. – P. 17180-17186.

5. T. Liang, P. Zhang, P. Yuan, S. Zhai. In-plane thermal transport in black phosphorene/graphene layered heterostructures: a molecular dynamics study, Physical Chemistry Chemical Physics. – 2018. - V. 20. - 21151.

6. D.V. Shein, D.V. Zav'yalov. Calculating thermal properties of phosphorene using a deep learning force field // European Physical Journal Plus. – 2024. – V. 139. – Is. 9. – Article 863.

7. С.А. Созыкин Машинообученный потенциал Li-C для наноматериалов // Журнал технической физики – 2025. – Т. 95. - Вып. 3. – С. 449 – 457.

8. P. Li, I. Appelbaum. Electrons and holes in phosphorene // Physical Review B. – 2014. – V. 90. – 115439.

9. S. Fukuoka, T. Taen, T. Osada. Electronic structure and the properties of phosphorene and few-layer black phosphorus // Journal of the Physical Society of Japan. – 2015. – V. 84. – 121004.

10. N.T. Hung, A.R.T. Nugraha, R. Saito. Quantum ESPRESSO course for solid-state physics. – Jenny Stanford Publishing, 2023. – 372 p.

Завьялов Дмитрий Викторович, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Физика» Волгоградского государственного технического университета, Россия, город Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28, 400005, телефон +7 917 337-37-22, email: sinegordon@gmail.com.

Конченков Владимир Игоревич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика» Волгоградского государственного технического университета, Россия, город Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28, 400005, телефон +7 904 756 86 41, e-mail: kontchenkov@yandex.ru .

Полянский Евгений Олегович, аспирант кафедры «Физика» Волгоградского государственного технического университета, Россия, город Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28, 400005, телефон +7 919 799 92 98, email: irongamer@yandex.ru

Шеин Данила Валерьевич, аспирант кафедры «Физика» Волгоградского государственного технического университета, Россия, город Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28, 400005, телефон +7 904 773-83-58, e-mail: danil.shein2013@yandex.ru

Zav'yalov Dmitry Viktorovich, Head of the Department of Physics, Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin Ave., Volgograd, Russia, 400005, +7 917 337-37-22, email: sinegordon@gmail.com.

Konchenkov Vladimir Igorevich, Associate Professor of the Department of Electronic Computing Machines and Systems, Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin Ave., Volgograd, Russia, 400005, phone: +7 904 756 86 41 , e-mail: kontchenkov@yandex.ru

Polyanskiy Eugeniy Olegovich, postgraduate student of the Department of Physics, Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin Ave., Volgograd, Russia, 400005, phone: +7 919 799 92 98, email: irongamer@yandex.ru.

Shein Danila Valeryevich, postgraduate student of the Department of Physics, Volgograd State Technical University, 28 V.I. Lenin Ave., Volgograd, Russia, 400005, phone: +7 904 773-83-58, e-mail: danil.shein2013@yandex.ru.

УДК 666.655

Мараховский Михаил Алексеевич, Иванова Елена Викторовна

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ УСКОРЕННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ СВОЙСТВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ

Работа посвящена исследованию различных способов стабилизации свойств являющихся эквивалентом естественных временных изменений параметров пьезоэлектрической керамики при нормальных условиях.

Целью работы было исследование влияния различных процессов на интенсивность старения электрофизических параметров пьезоэлектрической керамики. В зависимости от условий эксплуатации, к пьезоэлектрической керамике предъявляются повышенные требования по устойчивости к различным внешним воздействиям. Такое условие необходимо для выявления сохранения работоспособности пьезоэлектрической керамики при положительных и отрицательных температурах, при внешнем статическом давлении, при повышенной влажности. Для расширения области применения и повышения устойчивости свойств к внешним воздействиям зачастую применяются добавки и модификаторы, вводимые в исходный состав пьезоэлектрической керамики.

Задачей исследования была апробация воздействия указанных внешних факторов на электрофизические параметры промышленно выпускаемой пьезоэлектрической керамики системы ЦТС, без использования модифицирующих добавок.

В результате исследования установлено, что, изменение электрофизических параметров имеет необратимый характер в случае температурных воздействий, как результат частичной деполяризации. Воздействие повышенной влажности и статического давления на пьезоэлектрическую керамику вызывают изменения обратимого характера.

Ключевые слова: пьезокерамика, электрофизические параметры, старение, стабилизация.

Marakhovsky Mikhail Alekseevich, Ivanova Elena Viktorovna

INVESTIGATION OF METHODS FOR ACCELERATED STABILIZATION OF THE PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC CERAMICS

The work is devoted to the study of various ways to stabilize properties that are equivalent to natural temporary changes in the parameters of piezoelectric ceramics under normal conditions.

The aim of the work was to study the effect of various processes on the intensity of aging of the electrophysical parameters of piezoelectric ceramics. Depending on the operating conditions, piezoelectric ceramics have increased requirements for resistance to various external influences. Such a condition is necessary to identify the preservation of the performance of piezoelectric ceramics at positive and negative temperatures, at external static pressure, and at high humidity. Additives and

modifiers introduced into the initial composition of piezoelectric ceramics are often used to expand the scope of application and increase the resistance of properties to external influences.

The objective of the study was to test the effect of these external factors on the electrophysical parameters of commercially produced piezoelectric ceramics of the PZT system, without the use of modifying additives.

As a result of the study, it was found that the change in electrophysical parameters is irreversible in the case of temperature effects, as a result of partial depolarization. The effects of high humidity and static pressure on piezoelectric ceramics cause reversible changes.

Keywords: piezoceramics, electrophysical parameters, aging, stabilization.

Введение

Постоянное расширение применения пьезокерамических материалов в медицинской технике, в аэрокосмической и энергетической отраслях, в научной и исследовательской аппаратуре, требует от пьезокерамических элементов высоких значений электрофизических параметров, не снижающихся в процессе длительной эксплуатации [1, 2].

Одной из заключительных стадий изготовления пьезокерамических элементов является технологическая операция стабилизации свойств [3, 4]. Этот процесс позволяет привести характеристики пьезокерамических материалов к постоянным, стабильным показателям, практически не снижающимся со временем, что в свою очередь ведёт к повышению качества и надёжности конечных продуктов.

Однако, несмотря на важность стабилизации свойств пьезокерамических материалов, этот процесс всё ещё недостаточно изучен. Существуют различные методы стабилизации, но их эффективность и оптимальные режимы применения требуют дополнительного исследования [5, 6].

Задача исследования заключалось (состояла) в апробации влияния внешних воздействий положительных и отрицательных температур, влажности и статического давления на электрофизические параметры промышленно выпускаемой пьезоэлектрической керамики системы ЦТС, без использования модифицирующих добавок. Сопоставление полученных зависимостей с естественными временными изменениями параметров пьезоэлектрической керамики.

Основная часть

В качестве модельного объекта исследования был выбран промышленно выпускаемый пьезоэлектрический материал со структурой перовскита и химической формулой $Pb_{0,95}Sr_{0,05}(Zr_{0,53}Ti_{0,47})O_3$ + 1% Nb_2O_5. [6, 7]. Для указанного состава характерны высокие значения относительной диэлектрической проницаемости ($\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$ ~ 1620-1980), высокие значения пьезоэлектрического модуля (d_{33} ~ 310-460 пКл/Н), термическая стабильность ($T_к$ ~ 290 ºС), а также высокой повторяемостью свойств от партии к партии [8-10]

Пьезоэлектрический материал изготавливался твердофазным синтезом, смешивание исходных компонентов и помол проводились в планетарной шаровой мельнице Fritsch Pulverisette 6. Синтез пьезоэлектрического материала и спекание керамических элементов на его основе проводились в камерной печи Nabertherm L5/13/P330. Спечённые керамические заготовки шлифовались до необходимых геометрических размеров.

Для проведения экспериментальной части исследования была изготовлена серия пьезокерамических элементов в форме диска диаметром 10 мм и толщиной 1 мм. На плоскости пьезокерамических элементов, методом вжигания серебросодержащей пасты, наносились токопроводящие электроды.

Пьезокерамические элементы поляризовались на установке ПВС-5 при одинаковых условиях, при напряжении 1,5 кВ/мм.

Измерения свойств пьезокерамических элементов проводились спустя сутки после поляризации. Измерение электрофизических параметров проводилось на измерительном стенде Цензурка-МА 2.1 и d_{33}-meter APC.

Отслеживание изменения электрофизических параметров проводилось по нескольким группам, в каждой из которых было по 10 пьезокерамических элементов:

- влияние временного фактора (комнатная температура T = 21 ºC);
- влияние положительных температурных условий (низкотемпературная печь T = 100 ºC);
- влияние отрицательных температурных условий (климатическая камера T = -50 ºC);
- влияние внешнего статистического давления (статический гидравлический пресс);
- влияние влажности среды (камера с влажностью 100%).

Свойства пьезокерамических элементов (ОСТ), а также их относительное изменение, в результате воздействия различных факторов, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Относительные изменения свойств от факторов воздействия

Фактор воздействия	C_0, п	tg δ,	ε_{33}^T	d пК	п
Параметры ОСТ	1849	1,98	184	197	4
Время 14 суток	+0,1%	+5%	+2%	0%	-1
Время 35 суток	+0,8%	+12%	+1%	0%	-2
Влажность 24 часа	-4,5%	+200	+4,5	-2%	-1
Давление 14 суток	+1%	+2,5	+1,5	+1,	-1
Температура положит. 14 суток	-17%	+85%	-11%	-17	-2
Температура отриц. 14 суток	+1%	+152	+0,2	-1,5	+

Наибольшее изменение свойств пьезокерамических элементов было вызвано воздействием положительных и отрицательных температур. Причём, в случае положительных температур изменение свойств было комплексным. Воздействие отрицательных температур и влажность окружающей среды оказывали сильное воздействие (150-200%) преимущественно на значения тангенса угла диэлектрических потерь tg δ. Все перечисленные изменения свойств имели необратимый характер.

Выводы

В результате исследования установлено, что, изменение электрофизических параметров имеет необратимый характер в случае положительных температурных воздействий, как результат частичной деполяризации.

Повышенная влажность и отрицательная температура существенно и необратимо влияют на диэлектрические потери, как результат деградации материала под воздействием влаги. Статическое давление не приводило к существенным изменениям свойств пьезоэлектрической керамики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панич А.А., Мараховский М.А., Мотин Д.В., Кристаллические и керамические пьезоэлектрики [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2011, №1. – Режим доступа: http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/325 (доступ свободный).

2. Богуш М.В. Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. III. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Изд-во СКНЦ ВШ, Ростов-на-Дону, 2006. 335 с.

3. Смажевская, Е. Г. Пьезоэлектрическая керамика / Е. Г. Смажевская, Н. Б. Фельдман. – Москва : Советское радио, 1971. – 218 с.

4. Яффе Б. Пьезоэлектрическая керамика / Б. Яффе, У.Р. Кук, Г. Яффе. – Москва : Мир, 1974. – 290 с.

5. Ланин В.А. старение пьезокерамики системы ЦТС под действием электрических и механических напряжений. – Томск: автореферат диссертации, 2006. – 21 с.

6. Материалы пьезокерамические. Технические условия (отраслевой стандарт) ОСТ 110444 - 87, М., 1987.

7. Мараховский М.А. Исследование влияния примесных фаз исходного сырья на свойства сегнетоэлектрической керамики системы ЦТС / М. А. Мараховский, Л. А. Дыкина, В. В. Филь, А. А. Панич // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 4(240). – С. 152-157.

8. Таланов, М. В. Химико-технологические аспекты повышения функциональных характеристик сегнетожесткой пьезокерамики / М. В. Таланов, М. А. Мараховский // Тонкие химические технологии. – 2021. – Т. 16, № 1. – С. 67-75.

9. Фесенко Е. Г., Данцигер А. Я., Разумовская О.Н. Новые пьезокерамические материалы. - Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1983.

10. Lente M.H., Zanin A.L., Assis S.B., Santos I.A., Garcia D., Eiras J.A. Ferroelectric domain dynamics in PMN-PT ceramics // Ferroelectrics. Gordon and Breach Science Publishers. - 2003. 296, 149-155.

Автор: Мараховский Михаил Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры Информационных и измерительных технологий Института высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова, 10, 344090, телефон: +7 (904) 501-54-31, email: mmarahovsky@sfedu.ru

Author: Marakhovsky Mikhail Alekseevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Department of Information and Measurement Technologies, Institute of High Technologies and Piezotechnics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, Milchakova St., 10, 344090, phone: +7 (904) 501-54-31, email: mmarahovsky@sfedu.ru

Автор: Иванова Елена Викторовна, студент Института высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова, 10, 344090, телефон: +7 (951) 5 25-60-68, email : cheban@sfedu.ru

Author: Ivanova Elena Viktorovna, student at the Institute of High Technologies and Piezotechnics of the Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, Milchakova St., 10, 344090, phone: +7 (951) 525-60-68, email: cheban@sfedu.ru

УДК 54-07

Панич Евгений Анатольевич

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ, ФОРМИРУЕМЫХ НА ОСНОВЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФАЗ КИСЛОРОДНО-ОКТАЭДРИЧЕСКОГО ТИПА

Аннотация. Современное развитие материаловедения неразрывно связано с созданием «умных» материалов и структур. Особая роль отводится «умным» материалам, которые предназначены для решения ключевых задач при создании изделий и структур с высоким уровнем функциональности. К ним относятся многофункциональные материалы, приоритетное место среди которых занимает сегнетопьезоэлектрическая ЦТС-керамика (цирконат-титанат свинца), являющаяся основным материалом для датчиков и твердотельных актюаторов в устройствах электроники различного назначения [1]. Разработке перспективных структур, которые могут одновременно выполнять функции как сенсоров, так и актюаторов, отводится ведущая роль. Значительный интерес в этих исследованиях представляют пьезоэлектрические композиты.

В этой связи целью работы являлось исследование технологических особенностей шликерного литья и горячего прессования перспективных отечественных сегнетопьезоматериалов для получения активных элементов, служащих основой пьезокомпозитов.

Материалы и методы. Получение активных сегнетокерамических элементов осуществлялось методом шликерного литья и методом горячего прессования. В обоих случаях ставилась задача получения тонких (50-150 мкм) пластин/элементов с применением современного высокотехнологичного оборудования.

Результаты исследования и заключение. На основе проведенных исследований в области создания пьезокомпозитов 3-0 определены технологические параметры получения ЦТС-элементов толщиной 50-150 мкм, являющихся составной частью сегнетокерамических многослойных пьезоактюаторов и матриц адаптивной оптики. Показана также технология высокоплотных активных пьезоэлементов для конструирования устройств на основе пьезокомпозитов 1-3. Разработанные технологии служат основой создания пьезокомпозитов для конструирования инновационных устройств.

Ключевые слова: пьезокерамика, тонкопленочные элементы, пьезокомпозиты, датчики, актюаторы, технологии шликерного литья, технологии горячего прессования.

Panich Evgeny Anatolyevich

FEATURES OF TECHNOLOGIES FOR OBTAINING COMPOSITE PIEZOMATERIALS BASED ON OXYGEN-OCTAHEDRAL FERROPHASES

Annotation. The modern development of materials science is inextricably

linked with the creation of "smart" materials and structures. A special role is given to "smart" materials, which are designed to solve key tasks in creating products and structures with a high level of functionality. These include multifunctional materials, the priority among which is piezoelectric CTS ceramics (lead zirconate titanate), which is the main material for sensors and solid-state actuators in electronics devices for various purposes [1]. The development of promising structures that can simultaneously perform the functions of both sensors and actuators is given a leading role. Piezoelectric composites are of considerable interest in these studies.

In this regard, the aim of the work was to study the technological features of slip casting and hot pressing of promising domestic piezo materials for the production of active elements that serve as the basis of piezo composites.

Materials and methods. The production of active ferroceramic elements was carried out by the method of slip casting and the method of hot pressing. In both cases, the task was to produce thin (50-150 microns) plates using modern high-tech equipment.

Research results and conclusion. Based on the conducted research in the field of creation of piezo composites 3-0, the technological parameters for the production of CTS elements with a thickness of 50-150 microns, which are an integral part of ferroceramic multilayer piezoactuators and adaptive optics matrices, have been determined. The technology of high-density active piezoelectric elements for the construction of devices based on piezo composites 1-3 is also shown. The developed technology serves as the basis for the creation of piezo composites for the design of innovative devices.

Keywords: piezoceramics, thin-film elements, piezocomposites, sensors, actuators, slip casting, hot pressing.

Введение

Последние достижения в технологии производства пьезоматериалов позволили разрабатывать такие структуры, которые могут выполнять одновременно функции, как сенсоров, так и актюаторов. В связи с этим был определен новый ключевой тип элементов «умных структурных систем» - сенсор/актюатор (sensor/actuator). Этим критериям отвечают активные пьезоэлектрические композиты, которые могут использоваться в устройствах виброкомпенсации и виброизоляции, ПАВ преобразователях, датчиках деформации и утилизации электроэнергии. Отсюда вытекает необходимость совершенствования технологии получения пьезокомпозитов на базе отечественных функциональных пьезоматериалов.

Материалы и методы. Результаты исследования. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований технологических особенностей шликерного литья и горячего прессования отечественных перспективных пьезокерамических материалов (Таблица 1) с целью получения активных элементов для создания пьезокомпозитов, являющихся основой инновационных устройств.

Таблица 1

Электрофизические характеристики перспективных сегнетопьезокерамических ЦТС-материалов [2]

Материал		**tgδ, не бол**	**K_p не ме**	**Q**	**$\|d_3$ пКл**	**d пК**	
Материалы сегнетомягкие							
ЦТС-19	1620-198(	0,02(	0,5(	50-	150-	310	
ПКП-12	3500-450(	0,03(	0,5	60-	270-	700	
ЦТС-83Г*	1300-160(	0,03(	0,5(	65-	120-	260	
**** - рабочий температурный диапазон – до 300 °С***							
Сегнетожесткие материалы							
ПКП-31	900-1100	0,00	0,5	20	130-	200	

Совершенствование триады «состав-структура-свойства» монолитной сегнетопьезокерамики в настоящее время не удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к материалам при разработке перспективных технологий их создания, поэтому все большее внимание уделяется разработке и совершенствованию пьезокомпозитов - композиционных материалов с одним или несколькими пьезоактивными компонентами. Такими компонентами, например, могут быть поляризованные сегнетопьезокерамики и полимеры, проявляющие сегнетоэлектрические свойства, при рассмотрении которых наряду со свойствами компонентов важно учитывать особенности микрогеометрии и взаимного расположения компонентов, что влияет на электромеханические свойства и пьезоэлектрический отклик данных композитов [3].

Критерием классификации композитов является связность. Она является ключевой в описании свойств композитов. Для двухфазных компонентов возможно 10 типов связности, из которых в нашем рассмотрении представляют практический интерес два типа:

а) 3-0 - изолированные газовые поры в пьезоактивной матрице;

б) 1-3 - пьезоактивные стержни в пьезопассивной матрице.

Для каждого типа связности были разработаны технологические способы получения активных элементов пьезоактюаторов:

1. Шликерное литье для получения пленочных элементов толщиной до 50-100 мкм [4].

2. Метод резки монолитных высокоплотных сегнетокерамических блоков на тонкие твердотельные пластины/стержни [5] заданных размеров.

Процесс получения тонких (от 0,05 мм) сегнетокерамических элементов из ЦТС-порошков шликерным литьем включал следующие этапы:

- дезинтеграция порошка в жидкой среде;

- приготовление шликера, состоящего из пьезокерамического материала, который смешивали с добавлением растворителя, пластификатора и органического связующего.

Смешивание компонентов проходило в агатовой шаровой мельнице типа «Пульверизете» Fritsch (Германия). Подготовленный шликер выливался на

непрерывно движущуюся ленту литьевой установки при скорости движения лавсановой подложки 0,4 м/мин и зазором между фильерой и лавсановой подложкой от 300 до 500 мкм.

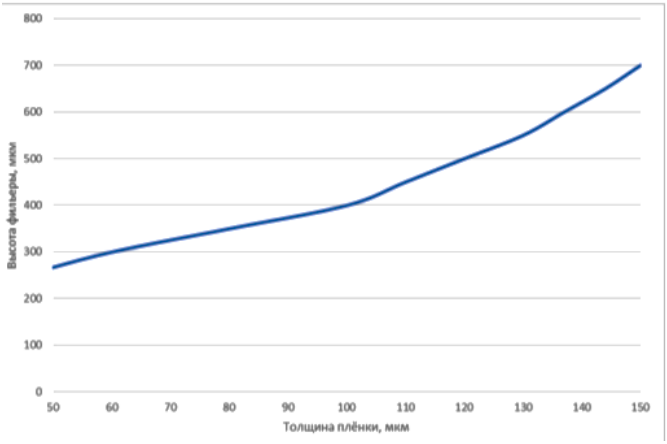


Рис. 1. Зависимость толщины пленки от задаваемой высоты фильеры

На толщину конечной пленки, помимо задаваемой высоты фильеры оказывает значительное влияние вязкость шликера. Поэтому было проведено исследование зависимости толщины пленки от вязкости шликера.

Зависимость толщины пленки (h) от вязкости шликера (η), при зазоре между фильерой и лавсановой подложкой 400 мкм, температуре окружающей среды 25^0C, представлена на рисунке 2. Вязкость шликера определялась с помощью прибора AND SV 10. Качество вылитой шликерной пленки оценивалось по толщине, однородности и эластичности. Данная технология позволяет получать сегнетоэлектрические пленки толщиной от 50 до 150 мкм .

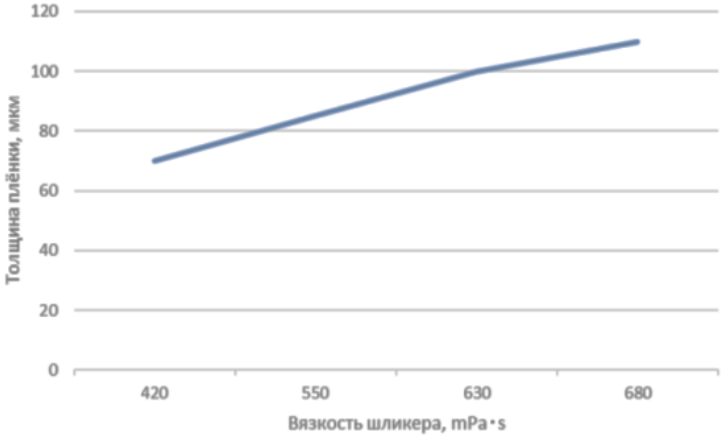


Рис. 2. Зависимость толщины пленки от вязкости шликера

Приоритетным направлением использования таких тонкопленочных элементов, является создание на их основе многослойных пакетов, являющихся составной частью пьезоактюаторов для прецизионных устройств перемещения.

Экспериментальные образцы многослойных пьезоактюаторов на основе пьезоматериала ПКП-12 были изготовлены **для устройств адаптивной оптики.** На рисунке 3 показан четырехслойный актюатор для матрицы адаптивного зеркала с параметрами ± 5÷7 мкм при + 300В; - 200В.

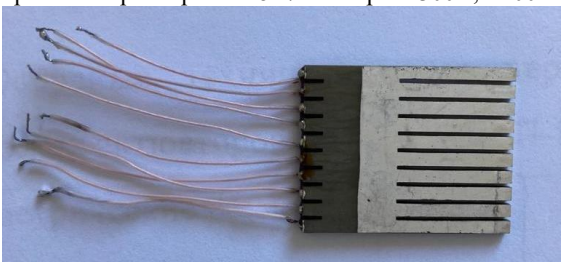
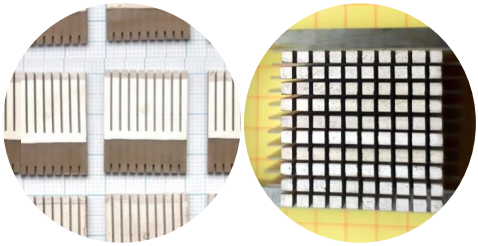


Рис. 3. Внешний вид пьезоактюатора для матрицы адаптивого зеркала

Изготовление высокоплотных чувствительных элементов в виде стержней различной формы пьезокомпозитов 1-3 производилось путем распила крупногабаритных блоков, полученных на установке горячего прессования УГП-110.

На рисунке 4 приведены разработанные в ходе исследований пьезосборки, где в качестве активных элементов применяются многослойные стержни размером (4,5x4,5x7,5)мм из пьезоматериалов ПКР-7-М и ПКР-12, которые используются при создании управляемых корректоров волнового фронта.



Габариты актюатора в матриц	от 1,5 x 1,5 x 18
Материал	ПКП-12, ПКР-7
Управляющее напряжение	0-300 В
Перемещение	до 18 мкм

Рис. 4. Примеры разработанных пьезосборок и их характеристики

Самостоятельным направлением развития композиционных пьезоматериалов являются **пористые пьезокомпозиты на основе связности 3-0**. Они являются основой высокочувствительных элементов в системах

неразрушающего контроля и диагностики, а также в гидроакустических преобразователях. Основным критерием при выборе пьезоматериала для использования в гидроакустических системах являются величина объемного пьезомодуля и объемная чувствительность q_v.

Объемная чувствительность определяется по формуле: —, где

- абсолютная диэлектрическая проницаемость.

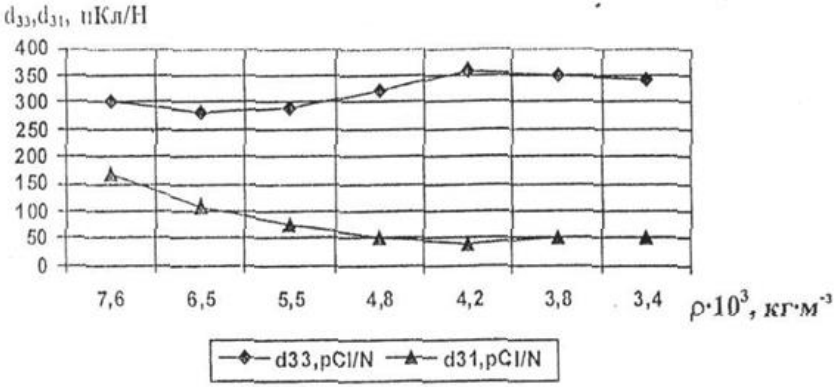


Рис. 5. Зависимость пьезомодулей d_{33}, d_{31} пьезоматериала КМБ-83 от его плотности

Как видно из рисунка 5 при $d_v=d_{33}+2d_{31}$ $d_v \approx d_{33}$ при $d_{33}/d_{31}>5$ при плотности менее $4{,}8*10^3$ кг*м$^{-3}$. Для увеличения d_v основной задачей является уменьшение диэлектрической проницаемости, что достигается при переходе к композиционным материалам с регулярной пористостью.

Исследования показали, что ЭФП ПККМ соответствуют требованиям, устанавливаемым ТЗ на НИР. Рекомендуются к использованию в УЗ преобразователях для дефектоскопии и толщинометрии неметаллических и полимерных композиционных материалов ПККМ, начиная с пористости 35%, при которой обеспечивается комплекс требований к ЭФП:

- относительная диэлектрическая проницаемость - не более 1000;
- отношение пьезомодулей d_{33}/d_{31} - не менее 5;
- отношение коэффициентов электромеханической связи K_{33}/K_p - не менее 2 при значениях K_{33} не менее 0,6;
- механическая добротность $Q_м$ - не более 80.

Таблица 2

ЭФП пористых ПККМ, полученных на образцах ЧЭ КМБ-19

Наименование характеристик	Пористость, %						
	0	12	24	35	45	53	55
1 Плотность, ρ, 10^3·кг/м^3	7,4 ± 0,1	6,5± 0,2	5,6± 0,2	4,8± 0,2	4,1± 0,2	3,5± 0,2	3,3± 0,2
2 Относительная диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$, не менее	1950	1100	750	570	350	240	180
3 Тангенс угла диэлектрических потерь, tgδ, не более	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
4 Пьезомодуль, d_{33}, пКл/Н не менее	340	340	340	360	350	340	340
5 Скорость звука, V^E_t, 10^3·м·с$^{-1}$	3,66	2,8± 0,1	2,0± 0,1	1,5± 0,1	1,2± 0,1	1,0± 0,1	0,7± 0,1
6 Коэффициент электромеханической связи, $K_т$, не менее	0,49	0,55	0,56	0,58	0,64	0,54	0,54
7 Соотношение K_t/K_p	0,82	1,40	2,40	3,05	3,75	3,60	3,58
8 Акустический импеданс Z_a, 10^6·кг/м^2·с	27,1	18,2	11,2	7,2	4,9	3,6	2,3
9 Добротность, Q_m	93	78	52	34	17	15	13

Из таблицы 2 следует, что начиная с пористости 35% обеспечивается комплекс требований по ЭФП к преобразователям для использования в дефектоскопии и толщинометрии неметаллических полимерных композиционных материалов.

Выводы

1. Разработан способ получения сегнето- пьезокерамических ЦТС-пленок толщиной 50÷150 мкм методом шликерного литья. При этом:

– установлен оптимальный состав и вязкость шликера;

– определены технологические параметры регулирования толщины пленки оптимизацией зазора между фильерой и лавсановой подложкой;

– предложена технологическая схема и оборудование для получения тонкопленочных пьезоэлементов, служащих основой многослойных пакетов-пьезоактюаторов. На базе сегнетопьезоматериала ПКП-12 разработаны экспериментальные образцы многослойных актюаторов для адаптивной оптики;

– разработана технология получения высокоплотных активных пьезоэлементов с управляемыми электрофизическими параметрами для конструирования устройств на основе пьезокомпозитов 1-3.

2. Показана возможность получения пористых пьезокомпозитов 3-0. Установлен критерий выбора процента пористости пьезоматериала для конкретных задач гидроакустики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самсонов Г.В., Ковальченко М.С. Горячее прессование. - Киев, 1962.-138 с.

2. Клевцов А.Н., Панич А.Е., Фесенко Е.Г. О контроле спекания керамики при методе горячего прессования // Тезисы докл. I Всесоюзн. конф. по физическим основам сегнетоэлектрическим и родственных материалов.-Звенигород, 1980. С.30-32.

3. Добровольский А.Г. Шликерное литье/А.Г. Добровольский//М.: «Металлургия», 1977.-140с.

4. Грибовский П.О. Горячее литье керамических изделий/ П.О. Грибовский//М.: Госэнергоиздат, 1961.-400с.

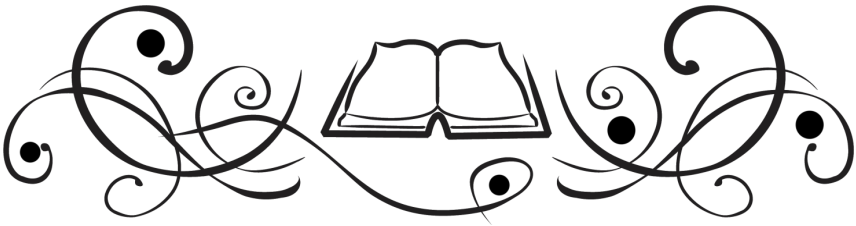
5. Хорошун Л.П. Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов / Л.П. Хорошун, Б.П. Маслов, П.В. Лещенко//Киев: Наукова Думка, 1989,-208 с.

6. Levassort F. A comparative study of different methods of evaluating effective electromechanical properties of 0-3 and 1-3 ceramics/polymer/composites/F. Levassort, V.Y Topolov//Journal of Phisics D: Applied Phisics. 2000. - Vol. 93, Issue 16, - P.2064-2068.

Автор: Панич Евгений Анатольевич, начальник лаборатории разработки технологического и контрольно-измерительного оборудования Научного конструкторско-технологического бюро «Пьезоприбор» Института высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова,10, 344090, телефон +7 (918) 558-71-86,
e-mail: 2987186@gmail.com

Author: Panich Evgeny Anatolyevich, Head of the Laboratory for the development of technological and control-measuring equipment of the Scientific Design and Technology Bureau "Piezopribor" of the Institute of High Technologies and Piezotechnics of the Southern Federal University, Russia, Rostov-on-Don, Milchakova Street,10, 344090, phone +7 (918) 558-71-86,
e-mail: 2987186@gmail.com

Секция
Промышленный дизайн и компьютерные технологии в инженерной подготовке



УДК 004.94

Клевцов Сергей Иванович

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВИДОВ КОНТАКТНЫХ ЗАНЯТИЙ НА КАЧЕСТВО ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ В ОБЛАСТИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Проведен анализ и прогнозирование результатов экзамена по дисциплине, в рамках которой изучается технология разработки программного обеспечения на языке высокого уровня для реализации инженерных задач, в зависимости от факторов, влияющих на качество подготовки и сдачу экзамена, а также определены факторы, влияющих и, что особенно важно, слабо влияющие на результаты экзамена.

Программирование, прогнозирование, машинное обучение, экзамен

Sergey Ivanovich Klevtsov

ANALYZING THE INFLUENCE OF TYPES OF CONTACT CLASSES ON THE QUALITY OF STUDENTS' TRAINING IN THE FIELD OF PROGRAMMING

The analysis and prediction of the examination results in the discipline, which studies the technology of software development in a high-level language for the realization of engineering tasks, depending on the factors affecting the quality of preparation and passing the examination, as well as the factors influencing and, most importantly, weakly influencing the results of the examination are determined.

Programming, prediction, machine learning, exam

В образовательной программе подготовки инженеров в области радиотехники, радиоэлектроники, разработки локальных и распределенных систем мониторинга и управления техническими объектами, систем и устройств интернета вещей (IoT), радиотехнических систем обязательно включается дисциплина, связанная с изучением основ программирования. В формируемых в настоящее время образовательных программах дисциплина называется «Программирование». Структурно дисциплина состоит из лекций, практических и лабораторных занятий и самостоятельной работы. В конце курса, как правило, проводится экзамен. В некоторых программах результаты работы студентов в семестре оцениваются с помощью дифференцированного зачета (зачета с оценкой). Но и в этом случае обычно в конце семестра проводится итоговая контрольная работа, задача которой, - оценить полученные знания и навыки. Фактически, это аналог итогового экзамена.

Основными целями освоения дисциплины являются изучение языка программирования высокого уровня для решения задач обработки информации в рамках профессиональной области деятельности инженера и изучение технологий и алгоритмов обработки данных. На качество подготовки влияет множество факторов, что сказывается на результатах экзамена или итоговой контрольной работы. Очевидно, что результат экзамена с высокой

достоверностью можно предсказать, анализируя результаты выполнения практических и лабораторных работ. Также на результаты экзамена, возможно, может повлиять посещаемость студентами контактных занятий.

Однако не все перечисленные факторы в одинаковой степени влияют на результаты сдачи экзамена и, в конечном счете, на степень понимания учебного материала. Поэтому ставилась задача провести анализ и прогнозирование результатов экзамена по дисциплине «Программирование» в зависимости от факторов, влияющих на качество подготовки и сдачу экзамена, а также определить факторы, влияющих и, что особенно важно, слабо влияющие на результаты экзамена.

Таким образом, необходимо провести:

- прогнозирование результатов сдачи экзамена в зависимости от факторов, значительно влияющих на результат на основе разработанного программного инструментального средства;
- определение элементов учебного процесса, которые слабо влияют на результат;
- определение элементов учебного процесса, которые значительно влияют на результат.

Кроме того, после проведения анализа планируется определить, как влияет посещение занятий и каких занятий на результаты экзамена, и есть ли и какая связь между результатами работы студента на практических и лабораторных занятиях и его результатами на экзамене.

В качестве источников данных взяты данные о посещаемости лекций, практических и лабораторных занятий по дисциплине за 3 года для различных учебных групп. Также имеются данные о полученных баллах студентами при сдаче практических и лабораторных работ. Эти данные собирались для контроля проведения занятий и учета результатов работы студентов в течение семестра. Пример данных, нормированных на максимум, приведен в табл. 1.

Таблица 1. Информация о посещаемости занятий и результатах сдачи практических и лабораторных работ (нормировка на максимум)

	outL	outP	outLR	ballP	ballLR	exz
0	0.111111	0.833333	1.00	0.900	0.90	0.875
1	0.722222	0.666667	1.00	0.800	0.80	0.750
2	0.666667	0.777778	0.75	0.800	0.80	0.750
3	0.222222	0.888889	0.50	0.675	0.60	0.650
4	0.166667	1.000000	1.00	0.850	0.85	0.925

В табл. 1 приняты следующие обозначения: outL – посещение лекций; outP – посещение практических занятий; outLR – посещение лабораторных занятий; ballP – средняя оценка в баллах, полученная студентом по результатам сдачи

практических работ; ballLR - средняя оценка в баллах, полученная студентом по результатам сдачи лабораторных работ; exz - результат экзамена.

Перед анализом данных была проведена очистка данных [1, 2]:

- из исходных данных были удалены записи студентов, которые не сдавали экзамен (все, кто не набрал баллов для допуска к экзамену);
- при очистке исходных данных были удалены несколько дубликатов записей, которые появились при корректировке записей в период проведения занятий;
- перед анализом проводилась обработка аномалий: проверялось соответствие данных допустимому диапазону, например, количество посещений лекций не может быть более 18. При превышении устанавливалось предельное значение.

Также были проведены преобразование данных. В процессе преобразования данных была проведена мин-макс нормализация данных [3]. Таким образом, данные приведены к интервалу [0,1], что, в частности, поможет лучше интерпретировать результаты анализа, так как после сопоставления полученных значений в соответствии с правилами перевода баллов в оценку в формате «отлично», «хорошо» и т.д., можно дополнительно получить категориальную оценку результатов экзамена.

В качестве основного метода анализа данных использовалась регрессия [1, 3]. Для прогнозирования результатов экзамена также использовался метод регрессии.

Для анализа данных и прогнозирования была разработана программа на языке Python, реализующая метод регрессии и методы вычисления статистических показателей [1-3].

Для оценки влияния факторов на целевую переменную (результаты экзамена) были посчитаны коэффициенты корреляции для всего набора данных и получена корреляционная матрица для влияющих факторов, которая позволила оценить степень влияния различных факторов на результат и определить факторы, которые существенно влияют и которые практически не влияют на результаты экзамена (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции для набора данных

	outL	**outP**	**outLR**	**ballP**	**ballLR**	**exz**
outL	1.00	0.03	-0.11	0.09	0.07	0.01
outP	0.03	1.00	0.07	0.36	0.11	0.34
outLR	-0.11	0.07	1.00	0.20	0.38	0.31
ballP	0.09	0.36	0.20	1.00	0.50	0.80
ballLR	0.07	0.11	0.38	0.50	1.00	0.58
exz	0.01	0.34	0.31	0.80	0.58	1.00

Результаты, представленные в табл.2 показывают, что наиболее значимыми факторы, влияющими на результаты экзамена, являются в порядке убывания, результаты, полученные при сдаче практических (коэффициент корреляции 0,8) и лабораторных (коэффициент корреляции 0,58) работ. Значительно ниже влияние посещаемости практик и лабораторных работ, а влияние посещения лекционных занятий незначительно.

Оценка связи результатов защиты лабораторных работ и сдачи экзаменов показывает слабую, но тем не менее, существующую зависимость, которая представлена на рис. 1.

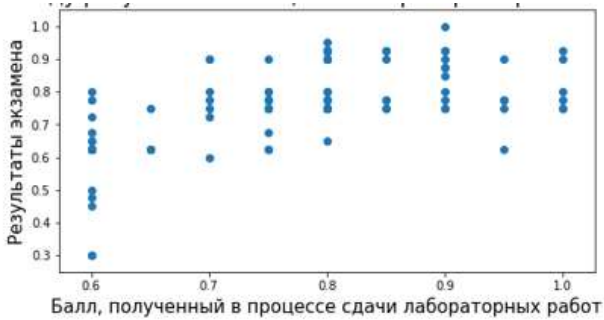


Рис. 1. Зависимость между результатами защиты лабораторной работы и сдачи экзамена

С другой стороны, влияние результатов, полученных на практике, более значительно (рис.2.). График демонстрирует более существенный вклад результатов подготовки, получаемой при проведении практических работ по сравнению с результатами лабораторных работ.

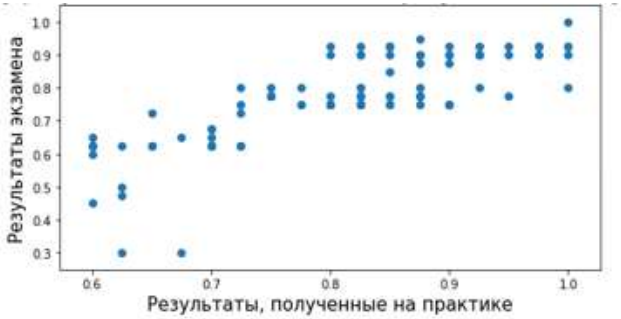


Рис. 2. Зависимость между результатами, полученными при сдаче практических работ, и сдачи экзамена

Учитывая вышеприведенные результаты, для проведения прогнозирования были выбраны наиболее значимые факторы, влияющие на результаты экзамена: ballP – средняя оценка в баллах, полученная студентом по результатам сдачи практических работ; ballLR - средняя оценка в баллах, полученная студентом по результатам сдачи лабораторных работ.

В результате была получена модель регрессии, которая с высокой точностью прогнозирует результаты экзамена в зависимости от данных факторов (рис. 3).

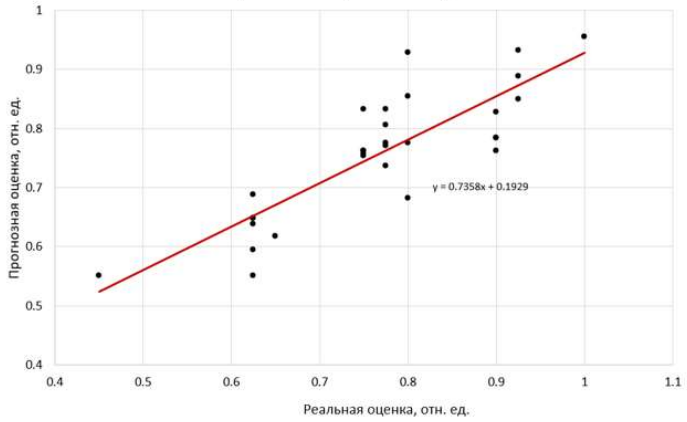


Рис. 3. Соотношение реальной и прогнозной оценки экзамена

Средняя квадратическая ошибка составляет не более 7 баллов из 100 (рис.4)

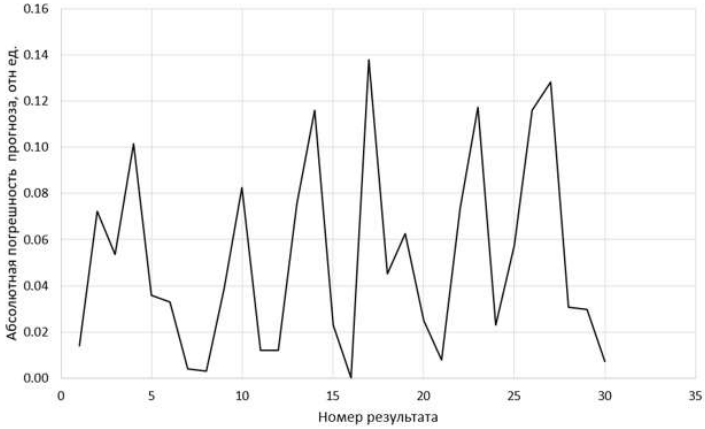


Рис. 4. Ошибка прогнозирования

Выводы

Результаты проведенного анализа показали, что для дисциплин, связанных с изучением программирования на языке высокого уровня:

- количество посещений лекций практически не влияет на результаты экзамена;
- влияние посещения практических и лабораторных занятий оказывает некоторое влияние на результаты экзамена, причем влияние количества посещений практических занятий выше;
- результаты, полученные при сдаче практических и лабораторных работ, как и ожидалось, значительно влияют на результаты экзамена, однако влияние практических занятий выше, чем лабораторных.

Таким образом, учитывая крайне незначительное влияние посещения лекций на формирование практических навыков разработки программ можно рекомендовать рассмотреть возможность отказа от проведения лекционных занятий по дисциплинам, связанным с программированием, не включать их в учебные планы подготовки, заменив практическими или лекционно-практическими занятиями.

Для целей более эффективной подготовки по дисциплинам, связанным с программированием, целесообразно делать акцент на проведении практических занятий (2 академических часа) в противовес лабораторным занятиям (4 академических часа).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маккини У. Python и анализ данных/ пер. с англ. А.А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 540с.

2. Коэльо Л. П., Ричарт В. Построение систем машинного обучения на языке Python. 2-е издание/ пер. с англ. Слинют А. А. - М.: ДМК Пресс, 2016. - 302 с.

3. Орельен Ж. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем. / пер. с англ. - СпБ.: ООО “Альфа-книга”: 2018. - 688 с.

Автор: Клевцов Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры встраиваемых и радиоприемных систем Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347922, телефон: +7 (928) 760-22-76, email: siklevcov@sfedu.ru

Author: Klevtsov Sergey Ivanovich, PhD (technical sciences), associate professor, Embedded and Radio Receiving Systems Department, Institute of Radio Engineering Systems and Control, South Federal University, Russia, Taganrog, Nekrasovsky per. 44, 347922, phone: +7 (928) 760-22-76, e-mail: siklevcov@sfedu.ru.

УДК 515.2+655.1

Цыганкова Маргарита Михайловна, Барвенко Виктория Ивановна,
Гривцов Владимир Владиславович

ДИЗАЙН СБОРНИКА ИЗБРАННЫХ ПРОИЗВЕДЕНИЙ ТУМАСА ТРАНСТРЁМЕРА «ВЗАИМОСВЯЗИ»

***Аннотация**. Целью данной работы является разработка дизайна сборника избранных стихотворений шведского автора, лауреата Нобелевской премии 2011 года Тумаса Транстрёмера "Взаимосвязи". В рамках исследования был проведен анализ существующих образцов поэтических изданий с особым вниманием к особенностям оформления лирических сборников. На основе этого анализа разработана концепция дизайна и иллюстраций, обоснован выбор стиля иллюстраций и формата издания. В работе подробно описан процесс создания оригинал-макета с использованием современных программных средств, а также представлены иллюстрации, отражающие ключевые моменты произведений и акцентирующие внимание читателя на основных элементах. Выбран нестандартный формат издания, который гармонично сочетается с другими книгами на полке и обеспечивает удобство чтения.*

Ключевые слова: дизайн книги, обложка, шрифт, модульная сетка, верстка книги.

Tsygankova Margarita Mikhailovna, Barvenko Victoria Ivanovna,
Grivtsov Vladimir Vladislavovich

SELECTED WORKS COLLECTION DESIGN TUMAS TRANSTRÖMER "INTERCONNECTIONS"

***Abstract**. The purpose of this work is to develop the design of a collection of selected poems by the Swedish author, 2011 Nobel Prize laureate Tumas Tranströmer "Relationships." As part of the study, an analysis of existing samples of poetry publications was carried out with special attention to the design features of lyrical collections. Based on this analysis, the concept of design and illustrations was developed, the choice of illustration style and publication format was justified. The work describes in detail the process of creating an original layout using modern software tools, as well as illustrations that reflect the key points of the works and focus the reader's attention on the main elements. A non-standard publication format has been chosen that harmonizes with other books on the shelf and provides readability*

Keywords: book design, cover, font, modular grid, book layout.

Введение.

Тумас Йоста Транстрёмер (1931–2015) — выдающийся шведский поэт XX века, удостоенный Нобелевской премии по литературе в 2011 году «за то, что его

краткие, полупрозрачные образы предоставляют нам обновлённое восприятие реальности». Транстрёмер также знаменит своими экспериментальными хайку, которые заметно отличаются от традиционных образцов жанра.

Представленная работа выполнена для популяризации творчества Транстрёмера, мало известного в России.

Цель данной работы заключается в создании уникального образа сборника, разработке дизайна и макета, а также создании иллюстраций.

Объектом исследования выступает иллюстрирование стихотворного сборника как средство эмоциональной передачи информации о характеристиках творчества поэта.

Предметом исследования служит иллюстрирование стихов Транстрёмера как способ для глубокого понимания идейного разнообразия его литературного наследия [1].

Анализ задания

Проект посвящен созданию дизайн-макета сборника стихов Тумаса Транстрёмера «Взаимосвязи». Для достижения этой цели необходимо выполнить следующие этапы: провести анализ существующих успешных изданий, определить подходящий формат и объем книги, разработать оригинальный иллюстративный материал и подобрать шрифты, гармонирующие с содержанием. Все этапы проекта, от творческого поиска до практической реализации, будут осуществляться с широким применением компьютерных графических технологий [2-4].

Учитывая, что основу книги составляет графический материал, при оценке дизайн-макетов ключевым критерием должно быть художественное оформление, особенно иллюстрации.

При создании книги необходимо комплексно подойти к выбору материалов, проработке иллюстраций и содержания, а также к верстке.

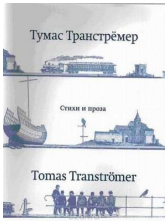
Сравнительный анализ.

В качестве подготовительного этапа перед созданием макета сборника было проведено исследование ранее изданных книг, включая зарубежные и отечественные примеры.

Чтобы понять, какие иллюстрации сопровождали произведения Тумаса Транстремера, мы рассмотрим обложки нескольких шведских и отечественных изданий его книг (рисунки 1–2).



Рис. 1 Обложки шведских изданий книг Транстремера



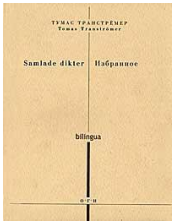


Рис. 2 Обложки российских изданий книг Транстремера

Обзор зарубежных изданий Транстремера демонстрирует разнообразие визуальных решений, используемых для оформления обложек. Каждый художник, работая над обложкой, стремится передать свое понимание поэтического мира автора, создавая уникальный и содержательный образ. В связи с недостаточной известностью Транстремера в России и ограниченным количеством его переводов, данная работа представляет собой возможность создать принципиально новую обложку, опираясь на существующие аналоги, но не ограничиваясь ими, и предлагая собственное видение поэзии автора.

В результате анализа было решено, что иллюстрации должны представлять собой свежий взгляд на содержание книги.

Допечатная подготовка оригинал-макета книги

Издание книги – сложный и многоэтапный процесс [5,6], требующий четкого планирования. Традиционно, верстка книги включает в себя следующие этапы: макетирование, подготовка текстового и иллюстративного материала, выбор шрифтового оформления, непосредственно верстка и создание оригинал-макета для печати.

Этап макетирования предполагает определение формата издания, полей и построение модульной сетки [7,8]. Формат книги играет важную роль, влияя на удобство чтения, портативность и общее восприятие произведения.

Для данного издания был выбран нестандартный квадратный формат (200х200 мм), поскольку формат должен обеспечивать комфортное восприятие иллюстраций. Квадратный формат позволяет гармонично размещать иллюстрации как в горизонтальной, так и в вертикальной ориентации.

Модульная сетка обеспечивает гармоничное и функциональное размещение всех элементов на странице. Она гарантирует достаточное место для полей при сборке книги и помогает создать сбалансированную композицию. В качестве примера, на рисунке 3 показана модульная сетка, использованная при верстке сборника Тумаса Транстремера «Взаимосвязи» [7].

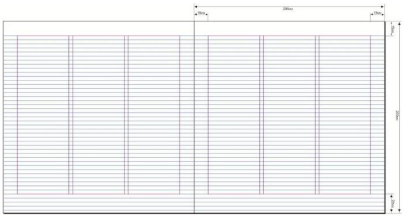


Рис. 3. Модульная сетка страниц Adobe InDesign

Модульная сетка содержит поля, которые ограничивают основной текст:

- внутреннее и внешнее – 15 мм;
- верхнее 15 мм и нижнее – 20 мм;

Размер страниц соответствует формату книги – 200х200 мм, учитывая обрезку страниц при сборке книжного блока.

Из справочно-вспомогательных элементов, которые необходимы для данного проекта, используются колонцифры и оглавления.

Колонцифры — это порядковые номера страниц. Они помогают быстро найти нужное место в книге и тем самым значительно облегчают пользование ею. Колонцифры должны быть хорошо заметны, но и не слишком бросаться в глаза при сплошном чтении [9]. В нашем случае колонцифры расположены в нижних углах под обрез.

Оглавление в книге (рисунок 4) дает читателю представление о том, как построена книга, а также при помощи оглавления читатель легко находит нужный ему раздел. В данной работе оглавление было помещено в начале книги.



Рис. 4. Оглавление книги «Взаимосвязи»

Подготовка текста первоначально производилась в программе Microsoft Word, а затем весь текст был скопирован в Adobe InDesign CS6, где уже происходила дальнейшая верстка. Были созданы стили для основного текста, заголовков, номеров страниц. В оформлении книги используется два вида шрифтов: для основного текстового блока Konkord-Retro и для заголовков Segoe Print.

AaБбВвГгДд 1234567890 AaBbCcDdEeFf

AaБбВвГгДд 1234567890 AaBbCcDdEeFf

Верстка иллюстраций представляет собой сложную задачу по созданию целостной композиции. Успешное решение требует развитого художественного вкуса и креативности. Иллюстрации должны быть расположены в соответствии с определенной структурой и визуально уравновешены как друг с другом, так и с текстовым содержанием [10].

Создание иллюстраций к книге

Расположение иллюстраций имеет большое значение для удобства пользования книгой и заметно влияет на весь ее художественный облик. В книге поэзии иллюстрации часто воспринимаются особенно, подчеркивая эмоциональное настроение автора.

Эскизы иллюстраций (рисунок 5) были нарисованы сначала от руки, а потом доведены до конечного результата в графическом редакторе Adobe Photoshop CS6 и CorelDraw X6. Окончательный вариант одной из страниц сборника «Взаимосвязи» представлен на рисунке 6.

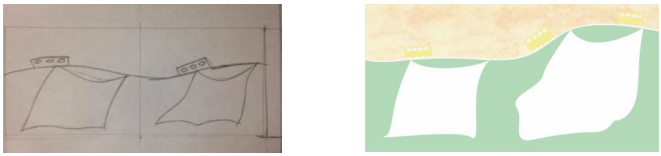


Рис. 5. - Эскиз и иллюстрация к стихотворению Лиссабон



Рис. 6. Окончательный вариант страницы к стихотворению Лиссабон

Выделяя основные черты скандинавского дизайна, было решено отразить их в иллюстрациях к данному сборнику произведений. Нейтральные цвета, иногда с выделенным акцентом, чистота цвета, ясность образа и стилизация формы это все отразилось в иллюстрациях сборника избранных произведений Тумаса Трансвемера «Взаимосвязи». Каждая иллюстрация несет смысловое значение, непосредственно связанное со стихом, и создает с помощью цвета атмосферу, для чтения.

В разработке дизайна книги основополагающий элемент – это дизайн обложки. Правильно созданный дизайн – обложка и внутреннее художественное оформление придают книге оригинальный, эстетичный внешний вид [10].

Для разработки макета обложки книги используются пастельные цвета и реалистичные изображения (рисунок 7).

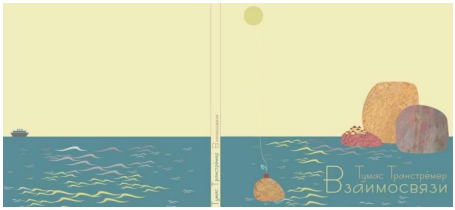


Рис. 7. Разворот обложки

Вид иллюстрационной верстки определяется характером размещения в издании не полноформатных (не занимающих полную полосу) изображений. Иллюстрации расположены на странице по типу полосной верстки, когда изображение располагается на всю страницу. Практически все иллюстрации в книге завершают ту часть, в которой описывается та или иная сцена, характеризующая данное изображение. Подготовка и верстка книги производилась в программе InDesign CS2.

В процессе подготовки макета книги все графические элементы были конвертированы в цветовую схему CMYK, что обеспечивает их корректное воспроизведение при офсетной печати. Для внутреннего книжного блока использована мелованная бумага плотностью 170 г/м². Печать выполнена офсетным способом в полноцветном режиме (4+4, CMYK), в соответствии с принятыми стандартами.

Выводы

В рамках проекта "Дизайн сборника избранных произведений Тумаса Транстремера «Взаимосвязи»" был создан оригинал-макет книги. Результатом стал уникальный дизайн поэтического сборника, ориентированного на взрослую аудиторию. Оригинальное художественное оформление, включая иллюстрации и обложку, призвано привлечь внимание ценителей поэзии. Дизайн книги стремится визуализировать поэтический замысел, используя абстрактные цветовые пятна и формы, чтобы создать атмосферу созвучную стихам. Цветовая гамма иллюстраций тщательно подобрана, чтобы отразить цветовую насыщенность, семантику и скрытый смысл каждого стихотворения, делая его более доступным для восприятия.

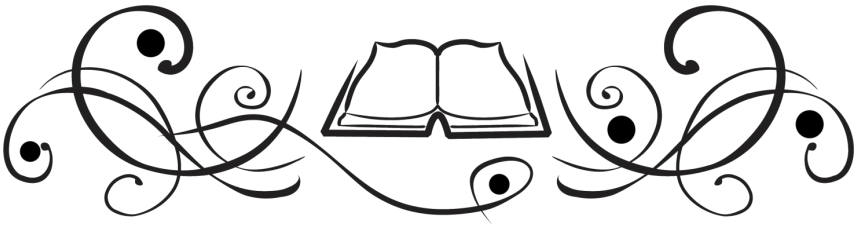
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Транстремер Т. Стихи и проза. - М.: Изд-во «ОГИ», 2012. - 328 с
2. Горшунова А.И., Барвенко В.И., Аббасов И.Б. Дизайн сборника стихов «Чудо-юдо». В сборнике: Инженер настоящего и будущего: практика и перспективы развития партнерства в высшем техническом образовании. Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. В 2-х томах. Ростов-на-Дону - Таганрог, 2024. С. 334–342.
3. Пилевина Я.Б., Гривцов В.В., Литюк Л.В. Дизайн сборника стихов Омара Хайяма «Рубаи». В сборнике: Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении КомТех-2023. Материалы Всероссийской

научно-технической конференции с международным участием в двух томах. Ростов-на-Дону, 2023. Т.1. С. 299–308.
4. Авраменко С.И., Гривцов В.В., Корецкая С.С. Дизайн детской книги В.П. Катаева «Цветик-семицветик». В сборнике: Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении: КомТех-2024. Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, в двух томах. Ростов-на-Дону, 2024. С. 128–136.
5. Пикок Дж. Издательское дело. Книга от замысла до упаковки. – М.: ЭКОМ, 2002. – 401 с.
6. Щепакин М.Б., Петровский В.И., Фролов И. П., Капитонов А.Н. Курс макетирования и верстки: «Издательство Международного института рекламы». - М.: 2001. -147 с.
7. Элам К. Графический дизайн. Принцип сетки. – Санкт-Петербург: Питер, 2014. – 120 с.
8. Лаптев В. Модульная сетка. Проектирование. – М.: Аватар, 2009. – 208 с.
9. Буковецкая О.А. Дизайн текста: шрифт, эффекты, цвет - 2-е изд., - Москва: ДМК Пресс. - 278 с. - ISBN 5-89818-025-7. - URL: https://ibooks.ru/bookshelf/26539/reading (дата обращения: 23.04.2025).
10. Феличи Д. Типографика: шрифт, верстка, дизайн. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2014. – 496 с.

Автор: Маргарита Михайловна Цыганкова, студентка, кафедра инженерной графики и компьютерного дизайна, Института радиотехнических систем Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Чехова 22, 347928, телефон: +7(8634)37-17-94, email: ikg@sfedu.ru.
Author: Margarita Mikhailovna Tsygankova, student, Department of Engineering Graphics and Computer Design, Institute of Radio Engineering Systems, Southern Federal University, 347928, Russia, Taganrog, 22 Chekhov Street, phone: +7(8634)37-17-94, email: ikg@sfedu.ru.
Автор: Виктория Ивановна Барвенко, доцент Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Чехова 22, 347928, телефон: +7(8634)37-17-94, email: ikg@sfedu.ru.
Author: Victoria Ivanovna Barvenko, Associate Professor Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, 347928, Russia, Taganrog, 22 Chekhov Street, phone: +7(8634)37-17-94, email: ikg@sfedu.ru.
Автор: Владимир Владиславович Гривцов, кандидат технических наук, доцент Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, улица Чехова 22, 347928, телефон: +79185949373, email: gvv@sfedu.ru.
Author: Vladimir Vladislavovich Grivtsov, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Institute of Radio Engineering Systems and Control of the Southern Federal University, 347928, Russia, Taganrog, 22 Chekhov Street, phone: +79185949373, email: gvv@sfedu.ru.

Секция
Инфокоммуникационные технологии



УДК: 004.04

Слепов Владислав Александрович, Чикрин Дмитрий Евгеньевич

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ НОТ И НОТНЫХ ГРУПП В ЗАШУМЛЕННОЙ АУДИОЗАПИСИ

В данной работе рассматривается проблема классификации нот и нотных групп в зашумленной аудиозаписи. Целью данной работы является разработка алгоритма, основанного на спектральном анализе сигнала с использованием оконного преобразования Фурье и пороговой фильтрации амплитуд. Для повышения производительности исходный сигнал был разделен на части, после чего для каждой из них вычислялись частотные и амплитудные характеристики. На основе максимальных амплитуд в спектре определяются доминирующие частоты, которые сопоставляются с музыкальными нотами посредством нелинейной аппроксимации. В результате поделанной работы, реализован метод позволяющий преобразовывать выделенные частоты в MIDI-формат с сохранением длительности нот.

Ключевые слова: классификация, выделение признаков, определение нот, определение нотных групп, оконное преобразование Фурье, пороговая фильтрация.

Slepov Vladislav Alexandrovich, Chikrin Dmitry Evgenievich

AUTOMATED CLASSIFICATION OF NOTES AND MUSICAL GROUPS IN NOISY AUDIO RECORDINGS

This paper examines the problem of classifying notes and musical groups in a noisy audio recording. The purpose of this work is to develop an algorithm based on spectral analysis of a signal using a windowed Fourier transform and threshold filtering of amplitudes. To improve performance, the original signal was divided into parts, after which frequency and amplitude characteristics were calculated for each of them. Based on the maximum amplitudes in the spectrum, the dominant frequencies are determined, which are compared with musical notes by means of nonlinear approximation. As a result of the work done, a method has been implemented that allows converting the selected frequencies into a MIDI format while maintaining the duration of the notes.

Keywords: classification, feature extraction, note definition, note group definition, windowed Fourier transform, threshold filtering.

Введение

Автоматическая транскрипция музыкальных аудиозаписей в нотную графику является ключевой задачей в области обработки звука. Наличие шума, полифония (наложение нот) и искажения спектра при обработке сигнала существенно снижают точность распознавания. Существующие методы, основанные на машинном обучении или классических алгоритмах, часто требуют значительных вычислительных ресурсов или демонстрируют низкую устойчивость к помехам, что ограничивает их применение в реальном времени.

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки алгоритмов, способных эффективно классифицировать ноты в зашумленных записях с минимальными ресурсными затратами.

В данной работе предлагается метод классификации нот и нотных групп, сочетающий оконное преобразование Фурье (STFT) с пороговой фильтрацией для подавления шумовых гармоник. В отличие от существующих решений, таких как алгоритмы на основе скрытых марковских моделей, данный подход фокусируется на локальном анализе коротких временных сегментов (окон), что повышает точность определения частот в условиях интерференции.

Получение частотных и амплитудных характеристик из спектра сигнала. Предобработка сигнала. Для повышения производительности алгоритма исходный аудиосигнал (рис. 1) разделяется на четыре равные части (рис. 2). Это позволяет:

- Уменьшить объем обрабатываемых данных за одну итерацию;
- Снизить нагрузку на память при анализе длительных записей;
- Повысить точность определения нот в отдельном окне.

Для сигнала длительностью N отсчетов каждая часть имеет длину $[N/4]$, а последняя часть захватывает оставшиеся отсчеты. Практические тесты показали, что такое разделение сокращает время обработки, по сравнению с анализом целого сигнала.

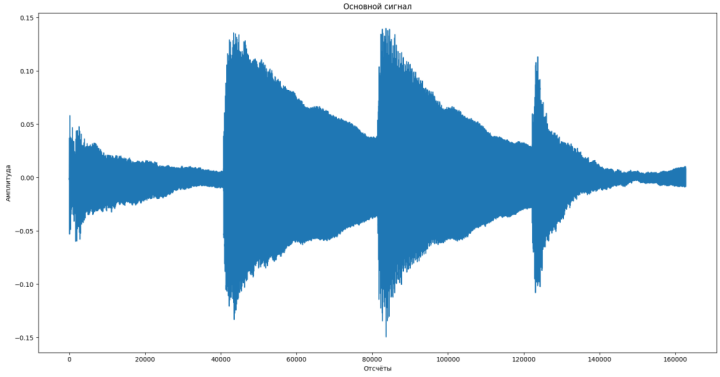


Рис. 1. Изначальное представление сигнала

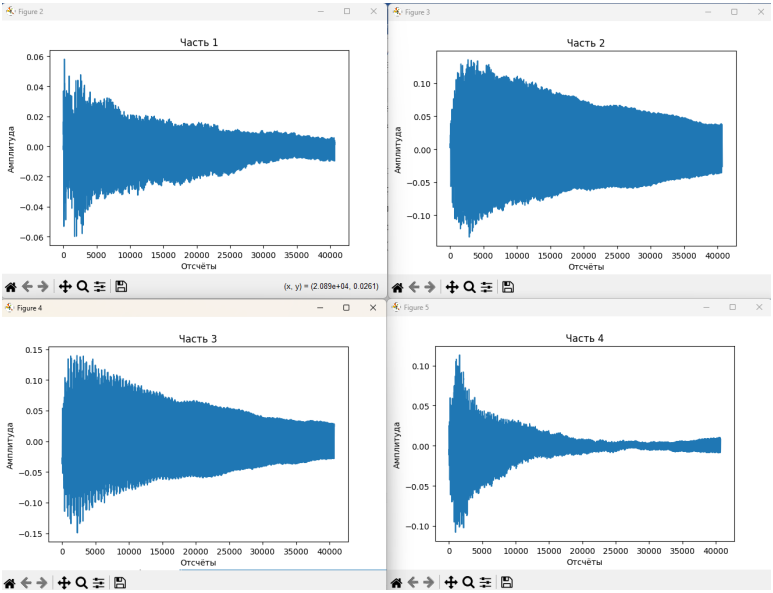


Рис. 2 Разделенный сигнал

Оконное преобразование Фурье. Для анализа нестационарных характеристик сигнала применяется оконное преобразование Фурье с параметрами:

- Длина окна: 100 мс, что соответствует временному разрешению человеческого слуха для восприятия нот;
- Тип окна: прямоугольное, чтобы минимизировать вычислительную нагрузку;
- Шаг окна: 100 мс.

STFT сигнала вычисляется путём перемещения аналитического окна g(n) длиной M по сигналу и вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ) для каждого сегмента данных с окном. Окно перемещается по исходному сигналу с интервалом R отсчётов, что эквивалентно $L = M - R$ отсчётам перекрытия между соседними сегментами [7, 8].

Большинство оконных функций затухают на краях, чтобы избежать спектральных колец. ДПФ каждого оконченного сегмента добавляется к комплексной матрице, которая содержит амплитуду и фазу для каждой точки во времени и на частоте. Матрица STFT имеет вид:

$$k = \left\lfloor \frac{N_x - L}{M - L} \right\rfloor, \quad (1)$$

где N_x – длина сигнала $x(n)$, а символы ⌊ и ⌋ обозначают функцию округления до меньшего значения [9, 13].

Спектрограмма частотно-временного представления сигнала вычисляется по формуле (2):

$$\text{Spectogram}\ (t, w) = |STFT(t, w)|^2. \quad (2)$$

В программном коде используется модификация — частота дискретизации временно увеличивается в 4 раза (fs×4) на этапе поиска нот. Это повышает частотное разрешение, тем самым выделяя сильные ноты и отбрасывая шумы, а также позволяет точнее идентифицировать близкие гармоники.

Вычисление частотного диапазона по максимальным амплитудам. Пороговая фильтрация. После получения спектра для каждого окна выполняются:

1. Пороговая фильтрация: отсеиваются пики с амплитудой ниже 0.028 – эмпирически подобранное значение для подавления шума;
2. Поиск доминирующих частот: из оставшихся пиков выбирается частота с максимальной амплитудой. Для аккордов сохраняются все частоты выше порога;
3. Сопоставление с нотами: частоты преобразуются в MIDI-номера по формуле (3):

$$Note = 12 * \log_2\left(\frac{f}{440}\right) + 69. \quad (3)$$

Для преобразования частот сигнала в нотную нотацию реализован метод на основе равномерно темперированного строя (12-нотная октава). Алгоритм включает три этапа:

1. Вычисление индекса ноты – частота преобразуется в индекс эталонной ноты по формуле (4):

$$index = round(17.31232 \times \ln(f) - 47.37620, \quad (4)$$

где коэффициенты получены из соотношения (5):

$$Note = 12 * \log_2\left(\frac{f}{440}\right) + 69, \quad (5)$$

переведенного в натуральный логарифм;

2. Поиск по эталонным частотам – индекс используется для выбора ноты из предварительно сгенерированных массивов;
3. Коррекция погрешности – если отклонение входной частоты от эталона превышает 10 центов, выбирается ближайшая нота.

Таблица 1

Точность сопоставления частот (тестовый сигнал)

Частота, Гц	Ближайшая нота	Отклонение
440.1	A4	+ 0.3
493.8	B4	- 1.2

Выводы

В работе были рассмотрены методы для автоматизированной классификации нот и нотных групп в зашумленной аудио записи, на основе методов по предобработке сигналов, оконного преобразования Фурье, а также с помощью пороговой фильтрации с эмпирическим подобранным значением для подавления шума. Помимо этого, была разработана программа на MATLAB, для анализа частотно-временных характеристик, определения нот и нотных групп, а также преобразования их в midi-файл.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чикрин, Д. Е., Малюгина, А. А., Державин, Д. В., Егорчев, А. А. Автоматическая оценка и предобработка изображений видеопотока для задач машинного зрения // Естественные и технические науки. – 2018. – № 6. – С. 145-157.
2. Чикрин, Д. Е., Малюгина, А. А., Литвин, М. А., Миллер, А. Б., Степанов, А. Н. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации // Информационные процессы. – 2014. – № 14. – С. 326-339.
3. Чикрин, Д. Е., Степанов, А. Н., Голоусов, С. В., Главацкий, Н. В., Ермаков, Д. В., Кокунин, П. А. Нахождение оптимальных наборов признаков в задачах классификации воздействий на вибрационных датчиках // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2018. – № 7. – С. 147-153.
4. Конев А.А., Онищенко А.А., Костюченко Е.Ю., Якимук А.Ю. Автоматическое распознавание музыкальных нот // Системы анализа и обработки данных. – 2015. – №2. – С. 32-47.
5. Мелешкин А.А., Фирсова С.А. Разработка системы для автоматического распознавания аккордовой последовательности в цифровых аудиофайлах // Огарёв-Online. – 2021. – №5. – С. 51-64.
6. Shrikant Devidas Kharat, Sujay Sanjay Shekokar, Prajwal Sudhir Waghmare, Sarthak K. Hupare, Prof. Jayshree S. Mahajan Musical Notes Classification and Recommendation Using Machine Learning // International Journal For Research. – 2024. – №12. – С. 2154-2161.
7. Т. Шестакова, Г. Сорокин, С. Грицков Особенности обработки экспериментальных данных с помощью оконных функций // Technical University of Moldova. – 2017. – №1. – С. 225-230.
8. Р. М. Алиев Автоматическое распознавание нот в музыкальном сигнале на основе преобразования Фурье и вейвлет-анализа // Информационные системы и технологии. – 2011. – №1. – С. 35-43.
9. Jont B. Allen Short term spectral analysis, synthesis, and modification by discrete Fourier transform // Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing. – 1977. – №1. – С. 235 - 238.

10. Christopher A. Harte, Mark Brian Sandler, Martin Gasser Detecting harmonic change in musical audio // Proceedings of the 1st ACM workshop on Audio and music computing multimedia. – 2006. – №6. – С. 21-26.

11. Zhouyu Fu; Guojun Lu; Kai Ming Ting; Dengsheng Zhang A Survey of Audio-Based Music Classification and Annotation // IEEE Transactions on Multimedia. – 2010. – №13. – С. 303 - 319.

12. Antti Eronen Signal Processing Methods for Audio Classification and Music Content Analysis. – 1 изд. – Tampere: Tampere University of Technology, 2009. – 323 с.

13. Spectrogram. Spectrogram using short-time Fourier transform // MATLAB URL: https://www.mathworks.com/help/signal/ref/spectrogram.html (дата обращения: 08.04.2025).

Слепов Владислав Александрович, магистрант Института вычислительной математики и информационных технологий КФУ, Россия, город Казань, улица Кремлевская 35, 420111, телефон: +7 (9178) 59-74-24, email: inf.vlad.s@bk.ru

Slepov Vladislav Alexandrovich, Master's student, Institute of Computational Mathematics and Information Technologies of KFU, 35 Kremlevskaya Street, 420111, Kazan, Russia, phone: +7 (9178) 59-74-24, email: inf.vlad.s@bk.ru

Чикрин Дмитрий Евгеньевич, профессор, д.н. Института вычислительной математики и информационных технологий КФУ, директор института искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии КФУ, Россия, город Казань, улица Карима Тинчурина 31к2, email: dmitry.kfu@yandex.ru

Chikrin Dmitry Evgenievich, Professor, Doctor of Sciences, Institute of Computational Mathematics and Information Technologies, KFU, Director of the Institute of Artificial Intelligence, Robotics and System Engineering, KFU, 31k2 Karim Tinchurin Street, Kazan, Russia, email: dmitry.kfu@yandex.ru

УДК 621.396

Киливник Виталий Вадимович

РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЧЕБНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СТУДЕНЧЕСКОМ СООБЩЕСТВЕ

Цель исследования – разработка веб-приложения, предназначенного для удобного хранения и обмена учебными материалами среди студентов. Основные задачи включают проектирование архитектуры приложения, реализацию функционала (блог, чат, ToDo-лист), выбор технологий (HTML/CSS, Bootstrap, Django, PostgreSQL, Redis) и тестирование системы. В результате создано приложение, позволяющее студентам эффективно обмениваться конспектами, обсуждать учебные вопросы в чате и планировать задачи. Приложение демонстрирует высокую производительность и удобство использования.

Ключевые слова:

веб-приложение, студенческое сообщество, учебные материалы, блог, чат, todo-лист, django, postgresql, redis, bootstrap.

Kilivnik Vitaly Vadimovich

DEVELOPMENT OF A WEB APPLICATION FOR STORING AND DISTRIBUTING EDUCATIONAL MATERIALS IN THE STUDENT COMMUNITY

The objective of the study is to develop a web application designed for convenient storage and exchange of educational materials among students. The main tasks include designing the application architecture, implementing functionality (blog, chat, ToDo list), choosing technologies (HTML/CSS, Bootstrap, Django, PostgreSQL, Redis) and testing the system. As a result, an application was created that allows students to effectively exchange notes, discuss educational issues in the chat and plan tasks. The application demonstrates high performance and ease of use.

Keywords:

web application, student community, educational materials, blog, chat, todo list, django, postgresql, redis, bootstrap.

Введение

Современное образование активно меняется под воздействием цифровых технологий. Ученики и учителя всё чаще применяют онлайн-ресурсы для обмена знаниями, поэтому важно создавать специализированные платформы для хранения и распространения учебных материалов.

Однако существующие решения не всегда учитывают особенности студенческого сообщества: потребность в удобной навигации и быстром доступе к актуальным данным.

Создание веб-приложения, ориентированного на студентов, может решить эти задачи, предоставив пользователям интуитивно понятный интерфейс, эффективные инструменты поиска и обмена контентом,

коммуникации, а также механизмы модерации для поддержания качества материалов.

Основная часть

Веб-приложение — это клиент-серверное приложение, в котором клиент взаимодействует с веб-сервером при помощи браузера [1]. Другими словами, можно сказать, что это конкретная веб-страница, содержимое которой динамически меняется в зависимости от взаимодействия с пользователем. Таким образом, можно работать с готовым веб-приложением в любой точке мира, с любого устройства, подключенного к Интернету.

Постановка задачи и используемые технологии

Разрабатываемое веб-приложение должно соответствовать следующим требованиям:

– хранение и обмен материалами (лекции, конспекты);
– чат для обсуждения учебных вопросов;
– ToDo-лист для планирования задач;
– Панель администрирования для преподавателей.

Технологический стек, используемый при разработке:

– Frontend: HTML/CSS Bootstrap;
– Backend: Django (Python);
– База данных: PostgreSQL;
– Кеширование и WebSocket: Redis.

Подробнее о каждом инструменте:

HTML и CSS отвечают за разметку веб-страницу.

Аббревиатура HTML является сокращением от Hyper Text Markup Language, что в переводе с английского означает язык разметки гипертекста. Это означает, что это некая система, способная управлять расположением элементов на веб-странице [2]. Однако он не позволяет реализовать высококачественный дизайн страниц, поддерживаемый всеми браузерами, что в свою очередь позволяет использовать стилистический язык CSS.

Аббревиатура CSS расшифровывается как Cascading Style Sheets, что в переводе с английского означает каскадные таблицы стилей, под которыми подразумевается определенный формальный язык, позволяющий изменять и описывать внешний вид документа (страницы), ранее написанного на языке разметки.

В основном каскадные таблицы стилей используются при разработке веб-сайтов с целью графической обработки страниц, которая включает в себя настройку различных цветов, стилей, шрифтов и размещение отдельных блоков. Это означает, что в настоящее время CSS используется для описания внешнего вида веб-страниц [3].

Используя HTML и CSS, можно создать удобный и приятный интерфейс для пользователей веб-приложения. Однако, этого может не хватить, т.к. требуется очень точная настройка элементов веб-страницы. Поэтому для более удобного создания веб-приложения можно прибегнуть к бесплатному фреймворку с открытым исходным кодом Bootsrap [4]. Он

позволяет решить большинство проблем с адаптивностью под разные устройства (смартфоны, ноутбуки и т.д.).

Для логики работы веб-приложения используется фреймворк Django.

Django — это бесплатный высокоуровневый фреймворк с открытым исходным кодом, предназначенный для создания приложений на языке Python. Его основная цель — помочь разработчикам быстро и безопасно создавать серверную часть сайтов. Фреймворк предоставляет набор инструментов для типичных задач веб-разработки, включая: создание и структурирование нового приложения, работу с базами данных, реализацию бизнес-логики и многое другое [5][6].

Преимущества этого языка[5]:

– Универсальность. Подходит для программирования приложений и сайтов любого типа: от новостных и информационных порталов до полноценных социальных сетей и видеохостингов;

– Масштабируемость. Любой компонент Django можно заменить или модифицировать, не затрагивая другие;

– Уровень безопасности. Поддерживаются инструменты для защиты от хакерских атак и взлома;

– Открытость. Любой желающий может использовать Django для создания сайтов и приложений, включая их коммерческое распространение.

Для хранения данных выбор пал на систему управления базами данных PostgreSQL.

PostgreSQL — это бесплатная объектно-реляционная система управления базами данных (ОРСУБД) с открытым исходным кодом. С ее помощью можно гибко управлять базами данных: создавать, изменять или удалять записи в них. [8][9].

Особенности PostgreSQL[8]:

– Масштабируемость. PostgreSQL позволяет распределить входящие запросы между несколькими инстансами — экземплярами (репликами) БД;

– Кроссплатформенность. СУБД можно установить практически на любую известную операционную систему.

– Безопасность. PostgreSQL позволяет шифровать данные на разных уровнях, а также выбирать средства защиты информации от несанкционированного доступа;

– Расширяемость. Можно написать собственные функции для PostgreSQL на Python, PHP, Java и Ruby.

В данном веб-приложении СУБД используется как хранилище различных данных. С помощью языка Django осуществляется подключение к базе данных и дальнейший вывод из таблиц.

Redis (REmote DIctionary Server, «удалённый серверный словарь») — это нереляционная резидентная СУБД, хранящая данные в виде пар «ключ-значение».

Данную СУБД можно использовать как брокер сообщений, что очень востребовано при создании различных чатов в реальном времени.

Реализация

Внешний вид, а также функционал веб-приложения можно увидеть на рис.1

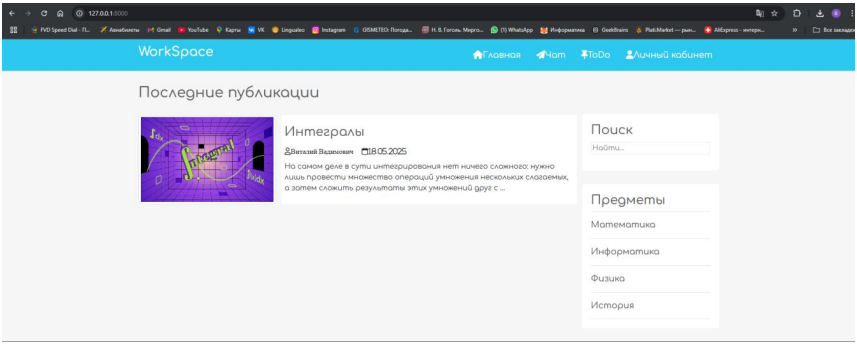


Рис. 1 Дизайн и логика работы веб-приложения

На главной странице можно увидеть статьи преподавателей на различные темы. Навигационная панель позволяет удобно использовать веб-приложение за счет простоты и интуитивности интерфейса. Каждая статья привязана к своему предмету, который составляется администратором, что упрощает поиск нужных материалов. Помимо главной страницы есть чат, где студенты могут задавать вопросы преподавателям в реальном времени, что обеспечивается Websocket соединением, настроенным с помощью библиотеки Django Channels. Для удобного планирования своего времени создана функция ToDo-листа, в котором пользователи могут добавлять задачи и закрывать их при завершении. Важно отметить, что у каждого пользователя есть своя личная учетная запись, что позволяет управлять их ролями, которые выдает администратор. Так студенты не смогут получить доступ к функционалу преподавателей, а преподаватели не смогут получить права администратора.

В общем виде работа веб-приложения отображена на рис.2

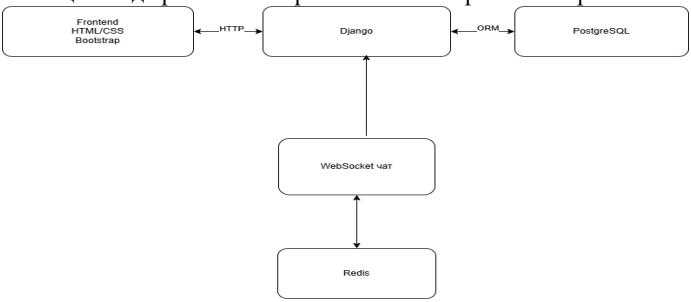


Рис. 2 работа веб-приложения

Демонстрацию работы чата можно увидеть на рис. 3.

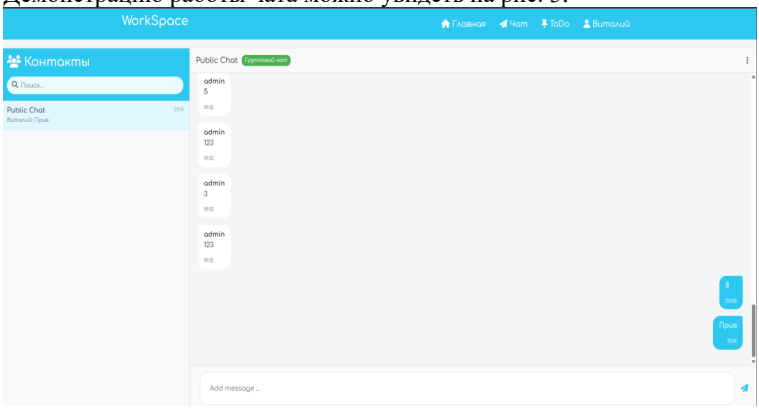


Рис. 3 чат пользователей

Демонстрацию работы ToDo-листа можно увидеть на рис. 4.

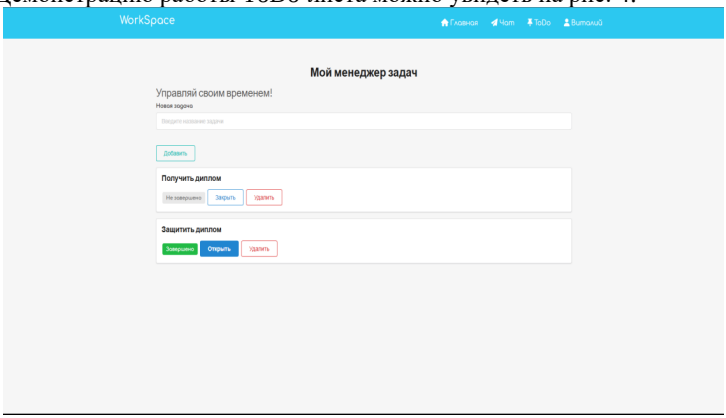


Рис.4 ToDo-лист

Выводы

В ходе работы было разработано веб-приложение, предназначенное для удобного хранения, обмена учебными материалами и организации коммуникации внутри студенческого сообщества. Приложение объединяет три ключевых модуля:

1) Блог – позволяет преподавателям публиковать учебные материалы, статьи и новости, поддерживая форматирование текста и комментарии.
2) Чат – обеспечивает мгновенный обмен сообщениями между пользователями с использованием WebSocket (Django Channels +

Redis), что особенно полезно для обсуждения сложных тем и совместной работы.

3) ToDo-лист – помогает студентам эффективно планировать учебные задачи, отмечать выполненные работы и отслеживать дедлайны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веб-приложение. URL: https://ru.ruwiki.ru/wiki/Веб-приложение (Дата обращения: 10.05.2025).
2. Основы HTML. URL: https://html5book.ru/osnovy-html/ (Дата обращения 11.05.20) .
3. База по вёрстке: самые основы CSS. URL: https://thecode.media/baza-po-vyorstke-samye-osnovy-css/ (Дата обращения 12.05.2025).
4. Bootstrap. URL: https://blog.skillfactory.ru/glossary/bootstrap/ (Дата обращения 13.05.2025).
5. Django для новичков: что это за фреймворк и зачем его изучать. URL: https://skillbox.ru/media/code/django-dlya-novichkov-chto-eto-za-freymvork-i-zachem-ego-izuchat/ (Дата обращения 14.05.2025).
6. Django: описание, особенности и области применения. URL: https://otus.ru/journal/django-opisanie-osobennosti-i-oblasti-primeneniya/ (Дата обращения 14.05.2025).
7. PostgreSQL: что это за СУБД и чем она хороша. URL: https://cloud.ru/blog/postgresql-chto-eto-za-subd (Дата обращения 15.05.2025).
8. PostgreSQL. URL: https://blog.skillfactory.ru/glossary/postgresql/ (Дата обращения 15.05.2025).
9. PostgreSQL: все, что нужно знать для быстрого старта. URL: https://www.reg.ru/blog/postgresql-vsyo-chto-nuzhno-znat-dlya-bystrogo-starta/?utm_source=ya.ru&utm_medium=referral&utm_campaign=ya.ru&utm_referrer=ya.ru (Дата обращения 15.05.2025).
10. Что такое Redis и как им пользоваться. URL: https://wiki.merionet.ru/articles/cto-takoe-redis-i-kak-im-polzovatsia (Дата обращения 16.05.2025).

Автор: Киливник Виталий Вадимович, студент Института высоких технологий и пьезотехники Южного федерального университета, Россия, город Ростов-на-Дону, улица Мильчакова 10, телефон: +7 (989) 850-20-72, email: vitaliikilivnik@gmail.com

Author: Kilivnik Vitaly Vadimovich, student of the Institute of Advanced Technologies and Piezotechnics of the Southern Federal University, Russia, Rostov-on-Don, Milchakova Street 10, phone: +7 (989) 850-20-72, email: vitaliikilivnik@gmail.com

УДК 621.396

Козина Инна Сергеевна

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ КОЛОННОЙ

В данной статье исследуются современные подходы к управлению ректификационными колоннами с использованием технологий искусственного интеллекта. Цель работы — провести анализ преимуществ ИИ-методов по сравнению с традиционными системами управления и оценить перспективы их внедрения в промышленность. В рамках исследования выполнен сравнительный анализ классических методов и современных ИИ-технологий, таких как машинное обучение и нейронные сети, а также выявлены ключевые направления развития ИИ для оптимизации процесса ректификации.

Результаты показывают, что традиционные методы демонстрируют ограниченную эффективность при нестабильных условиях эксплуатации, тогда как ИИ-технологии обеспечивают более точное прогнозирование и адаптивное управление. Кроме того, гибридные системы, объединяющие физические модели и ИИ, способствуют повышению энергоэффективности и качества разделения, что открывает новые возможности для повышения эффективности и надежности технологических процессов.

Ректификационная колонна, искусственный интеллект, нейронные сети, ПИД-регуляторы, гибридные системы управления.

Kozina Inna Sergeevna

THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO CONTROL THE DISTILLATION COLUMN

This paper explores modern approaches to the control of distillation columns using artificial intelligence (AI) technologies. The aim of the study is to analyze the advantages of AI methods compared to traditional control systems and to assess the prospects for their implementation in industry. A comparative analysis of classical control methods and contemporary AI technologies, such as machine learning and neural networks, is conducted, and key directions for the development of AI to optimize the distillation process are identified.

The results show that traditional methods demonstrate limited effectiveness under unstable operating conditions, whereas AI technologies provide more accurate forecasting and adaptive control. Additionally, hybrid systems that combine physical models with AI contribute to increased energy efficiency and improved separation quality, opening new opportunities for enhancing the efficiency and reliability of technological processes.

Distillation column, artificial intelligence, neural networks, PID controllers, hybrid control systems.

Введение

Ректификационная колонна — ключевое технологическое оборудование в химической, нефтяной и энергетической промышленности, обеспечивающее разделение смесей на различные компоненты с высокой точностью [1].

Традиционные системы управления основаны на моделях, регуляторах и автоматических системах, однако их эффективность ограничена сложностью процессов и изменчивостью условий эксплуатации [2]. В последние годы развитие искусственного интеллекта (ИИ) открыло новые возможности для повышения эффективности, надежности и адаптивности управления ректификационными колоннами [3].

Современные технологические процессы требуют высокой точности и быстрого реагирования на изменения параметров. Использование ИИ позволяет создавать системы, которые способные самостоятельно обучаться, предсказывать поведение оборудования и оптимизировать параметры работы в реальном времени. Цель данной статьи — проанализировать современные подходы и перспективы применения ИИ в управлении ректификационными колоннами, а также предложить возможные направления дальнейших исследований в этой области.

1 Классические системы управления ректификационными колоннами

Классические системы управления ректификационными колоннами основаны на использовании проверенных и широко применяемых методов автоматизации, таких как пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы, математические модели, построенные на физических законах, и методы оптимизации. Эти подходы зарекомендовали себя в промышленности благодаря своей простоте, надежности и относительно низкой стоимости внедрения.

ПИД-регуляторы являются одними из наиболее распространенных средств автоматического регулирования. Они функционируют за счет постоянного сравнения текущего значения управляемого параметра с заданным эталоном и последующего корректирования управляющего воздействия на основе пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих. Такой подход позволяет обеспечить стабильное поддержание параметров в заданных пределах при относительно постоянных условиях эксплуатации.

Еще одним важным направлением являются модели, основанные на физических законах, описывающих процессы внутри колонны. Обычно такие модели включают дифференциальные уравнения, отражающие тепловые и массопереносные процессы, а также динамику потоков сырья и продуктов. Эти модели позволяют предсказывать поведение системы и разрабатывать стратегии управления, основанные на расчетах и симуляциях. Внедрение таких моделей требует точного знания параметров оборудования и технологического процесса, что зачастую затруднено из-за сложности и вариативности условий.

Для повышения эффективности работы колонны применяются методы оптимизации, такие как линейное и нелинейное программирование, а также динамическое оптимальное управление. Они позволяют находить наиболее

выгодные режимы работы. Однако эти методы требуют проведения расчетов в режиме реального времени и наличия точных данных о текущем состоянии системы.

Несмотря на свою эффективность в стабильных условиях, классические системы управления сталкиваются с рядом ограничений. Основная проблема заключается в их низкой адаптивности к изменениям внешних и внутренних условий. В случае изменения состава сырья, колебаний температуры, давления или износа оборудования, эффективность регулирования значительно снижается. Это связано с тем, что физические модели и ПИД-регуляторы не способны быстро и точно реагировать на непредвиденные ситуации или нелинейные особенности процесса. В результате могут возникать отклонения от оптимальных режимов, снижение качества разделения и увеличение энергозатрат.

2 Системы управления с использованием искусственного интеллекта

В последние годы внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) в управление технологическими процессами стало одним из наиболее перспективных направлений развития автоматизации в промышленности [3]. В контексте ректификационных колонн использование ИИ позволяет значительно повысить точность, адаптивность и эффективность регулирования, а также обеспечить более устойчивую работу оборудования в условиях изменчивых внешних и внутренних факторов. Основные методы ИИ, такие как машинное обучение, нейронные сети, генетические алгоритмы и системы экспертных правил, предоставляют новые возможности для моделирования сложных нелинейных процессов, предсказания поведения системы и автоматического принятия решений на основе анализа больших объемов данных.

Машинное обучение — это область ИИ, которая позволяет системам самостоятельно обучаться на основе предоставленных данных без явного программирования всех правил [4]. В управлении ректификационной колонной машинное обучение используется для построения динамических моделей, способных точно отображать поведение процесса в различных режимах работы. Особенно эффективными являются нейронные сети, которые имитируют работу человеческого мозга и способны выявлять сложные нелинейные зависимости между входными и выходными параметрами системы.

Использование нейронных сетей позволяет создавать модели, предсказывающие такие параметры, как температура, давление, состав флегмы и паров, а также динамику изменения этих параметров во времени. Эти модели обучаются на исторических данных, полученных в процессе эксплуатации колонны, и позволяют управлять процессом в реальном времени, корректируя управляющие воздействия. Такой подход обеспечивает более точное регулирование, и позволяет быстро реагировать на изменения условий [5].

Генетические алгоритмы — это методы поиска решений, основанные на моделировании процесса естественного отбора и эволюции. В управлении ректификационной колонной генетические алгоритмы применяются для поиска оптимальных режимов работы, таких как температура, давление, расход сырья и

другие параметры, обеспечивающие максимальное качество разделения при минимальных энергозатратах. Эти алгоритмы позволяют находить глобальные оптимумы в сложных нелинейных пространствах решений, что особенно важно при наличии множества взаимосвязанных критериев [6].

Использование генетических алгоритмов способствует не только оптимизации текущих режимов, но и разработке стратегий долгосрочного планирования, что повышает общую эффективность работы установки. Например, при изменении состава сырья или требований к конечному продукту алгоритм может автоматически подобрать наиболее подходящие параметры, обеспечивая стабильное качество продукции и снижение затрат [7].

Одним из наиболее перспективных направлений является создание гибридных систем, сочетающих физические модели и методы ИИ [8]. Такие системы используют преимущества обеих подходов: физические модели обеспечивают базовую точность и интерпретируемость, а ИИ — адаптивность и способность к обучению [9]. В результате получается более надежная и точная система управления, способная учитывать сложные нелинейные зависимости и быстро реагировать на изменения условий.

Например, в гибридных системах нейронные сети могут использоваться для уточнения физических моделей, а генетические алгоритмы — для поиска оптимальных управляемых параметров на основе предсказаний нейронных сетей. Такой подход позволяет повысить устойчивость системы, снизить риск аварийных ситуаций и обеспечить более эффективное использование ресурсов.

Выводы

Проведенное исследование подтвердило, что традиционные методы управления ректификационными колоннами, несмотря на свою проверенную эффективность в условиях стабильной эксплуатации, существенно ограничены в возможностях адаптации к динамическим изменениям технологической среды. Их низкая чувствительность к вариациям состава сырья, температурных режимов и износа оборудования снижает общую эффективность и надежность процессов разделения, что особенно актуально в условиях современного промышленного производства.

Анализ современных подходов показал, что внедрение методов искусственного интеллекта, значительно расширяет возможности автоматизированного управления. Эти технологии позволяют моделировать сложные нелинейные процессы, предсказывать поведение оборудования и оперативно оптимизировать режимы работы в реальном времени. В результате достигается повышение точности регулирования, снижение энергозатрат, улучшение качества продукции и повышение экологической безопасности.

Также выявлено, что развитие ИИ в управлении колоннами сопряжено с рядом вызовов, включая необходимость обработки больших объемов данных, обеспечение надежности систем и их интерпретируемости. В будущем применение ИИ в промышленности обещает значительные преимущества, способствуя устойчивому развитию и экологической безопасности технологических процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов А.В., Петров В.С. Автоматизация и управление химическими процессами. - М.: Химия, 2018. - 320 с.

2. Смирнова Е.А. Современные методы оптимизации технологических процессов. - СПб.: Изд-во СПбГУ, 2020. - 245 с.

3. Кузнецов М.И. Искусственный интеллект в промышленной автоматике. - М.: Машиностроение, 2019. - 198 с.

4. Козина И. С., Заргарян Е. В. Применение АРС-управления в нефтегазовой промышленности. Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2024): сборник трудов XXII Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Таганрог, 5–7 декабря 2024 г.).: в 2 т. / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону, Таганрог: ДиректСайнс (ИП Шкуркин Д.В.), 2024. ISBN: 978-5-6051865-6-4 Т. 1.– 542 с. стр 350-354

5. Заргарян Е.В., Морозов Н.В. Необходимость разработки системы обнаружения утечек на нефтепроводе/ В сборнике: Донецкие чтения 2023: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности. Материалы VIII Международной научной конференции. Донецк, 2023. С. 141-143.

6. Заргарян Е.В., Заргарян Ю.А., Номерчук А.Я.. Оценка состояния динамического взвешивания с использованием фильтра Калмана // Известия ЮФУ. Технические науки. –2022. –No 2 (2022). –С. 236-249.

7. Zhang Y., Li X. AI-based control systems for distillation columns // Journal of Process Control. - 2021. - Vol. 98. - P. 45-56. URL:https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2021.105123 (дата обращения: 05.05.2025).

8. Lee S., Kim H. Machine learning applications in chemical process control // Chemical Engineering Journal. - 2022. - Vol. 428. - P. 131678. URL: https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135678 (дата обращения: 10.05.2025).

9. World Economic Forum. Artificial Intelligence in Industry. - 2023. URL: https://www.weforum.org/reports/ai-in-industry-2023 (дата обращения: 10.05.2025).

Автор: Козина Инна Сергеевна, студент кафедры САУ ИРТСУ Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347900, телефон: +7 (8634) 37-16-89, email: demidchik@sfedu.ru.

Author: Kozina Inna Sergeevna, student of the Department of ACS of the IRTSU of the Southern Federal University, Russia, Taganrog, lane Nekrasovsky 44, 347900, phone: +7 (8634) 31-11-43, email: demidchik@sfedu.ru .

УДК 621.396.62

Нагорный Владимир Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОГО РАДИОПРИЕМНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАДРАТУРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ В КВ ДИАПАЗОНЕ

Разработан и исследован программно-определяемый радиоприемник с использованием квадратурного преобразователя частоты на основе мультиплексора FST3253. В ходе экспериментов удалось успешно принять и демодулировать амплитудно-модулированные (АМ) сигналы в диапазоне коротких волн (КВ), что подтвердило работоспособность схемы квадратурного преобразования и приемного тракта в целом.

Квадратурный преобразователь частоты, радиоприемник, амплитудно-модулированный сигнал, мультиплексор.

Vladimir Alexandrovich Nagornyi

RESEARCH OF A SOFTWARE-DEFINED RADIO RECEIVER USING A QUADRATURE FREQUENCY CONVERTER IN THE SHORTWAVE BAND

A software-defined radio receiver was developed and investigated using a quadrature frequency converter based on the FST3253 multiplexer. During the experiments, it was possible to successfully receive and demodulate amplitude-modulated (AM) signals in the shortwave (SW) band, which confirmed the functionality of the quadrature conversion scheme and the whole receiving path.

Quadrature frequency converter, radio receiver, amplitude-modulate signal, and multiplexer.

Введение

С развитием цифровых технологий программно-определяемые радиосистемы становятся все более востребованными, поскольку позволяют выполнять модуляцию и демодуляцию радиосигналов без использования специализированной аппаратуры, применяя программную цифровую обработку. Такой подход обеспечивает высокую гибкость, простоту масштабирования и возможность поддержки различных видов модуляции без необходимости модификации аппаратной части.

В рамках выполняемого студенческого проекта был собран простой программно-определяемый радиоприемник, основанный на квадратурном преобразователе частоты, работающем в связке с микроконтроллерной платой *Raspberry Pi Pico*.

Основная часть

На рисунке 1 приведена структурная схема программно-определяемого радиоприемника, которая состоит из приемной антенны, преселектора,

квадратурного преобразователя частоты, платы Raspberry Pi Pico и персонального компьютера (ПК).

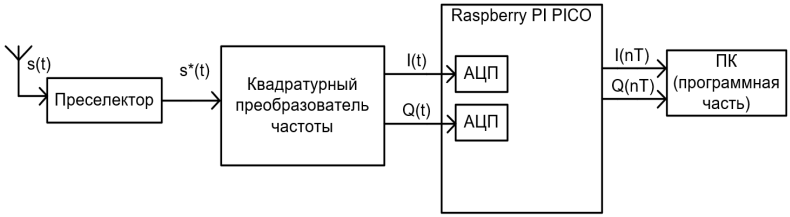


Рис. 1 Структурная схема программно-определяемого радиоприемника с использованием квадратурного преобразователя частоты

Преселектор выполнен на основе резонансного усилителя на биполярном транзисторе с колебательным контуром, перестраиваемым при помощи подстроечной катушки индуктивности. Изменяя индуктивность катушки, можно настроить резонансную частоту усилителя на нужную частоту. Такой контур выполняет функцию полосового фильтра, пропуская только узкую полосу частот и подавляя внеполосные сигналы. [1-4] Принципиальная схема резонансного усилителя приведена на рисунке 2.

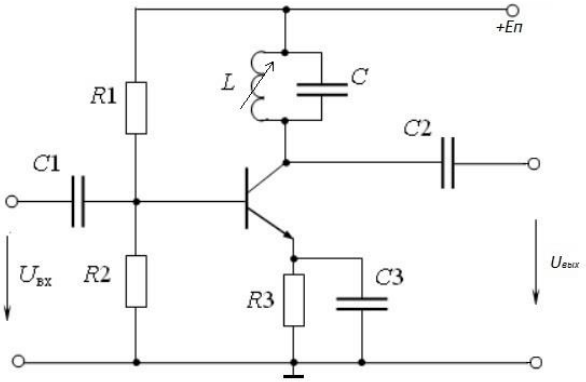


Рис. 2 Принципиальная схема резонансного усилителя

Квадратурный преобразователь частоты – это устройство, предназначенное для преобразования входного высокочастотного сигнала в две квадратурные компоненты: синфазную *I(t)* и квадратурную *Q(t)* составляющие. [5-6]

Данный тракт реализован на двух микросхемах: мультиплексоре *FST3253* и сдвоенном операционном усилителе *NE5532*.

Данная схема изготовлена на печатной плате размерами 44x45 мм, топология которой приведена на рисунке 3.

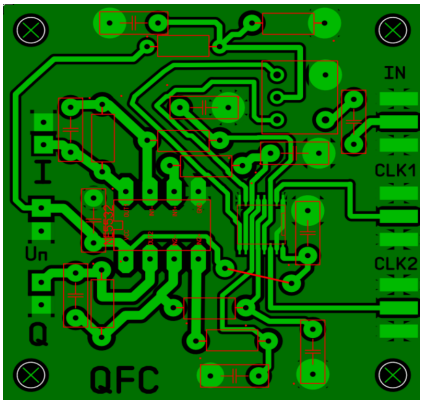
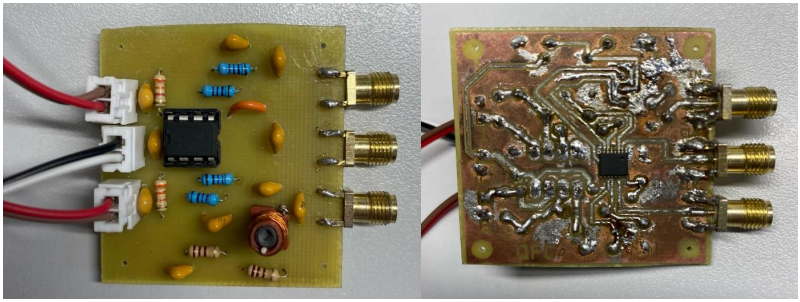


Рис. 3 Топология разработанного квадратурного преобразователя частоты

На рисунке 4 приведен изготовленный квадратурный преобразователь частоты.



а) *б)*

Рис. 4 Изготовленный квадратурный преобразователь частоты на печатной плате

Плата Raspberry Pi Pico используется для управления гетеродином (синтезатором частоты *SI5351*), получения оцифрованных значений квадратурных составляющих и их передачи в ПК для обработки сигнала.

Микроконтроллер *RP2040*, используемый в составе платы *Raspberry Pi Pico*, оснащен встроенным 12-битным аналого-цифровым преобразователем (АЦП). [7-9]

Все компоненты программного обеспечения, как на стороне ПК, так и на микроконтроллере разработаны на языке программирования *Python*.

Полученные цифровые отсчеты квадратурных составляющих с помощью программы на ПК преобразуются в двухканальный аудиопоток и передаются на виртуальное аудиоустройство, которое выбирается как *I/Q* вход в программе *HDSDR (High Definition Software Defined Radio)*. В данной программе выполняется цифровая обработка сигнала. [10]

На рисунке 5 показан внешний вид экспериментальной установки в режиме приема сигнала коротковолнового диапазона.

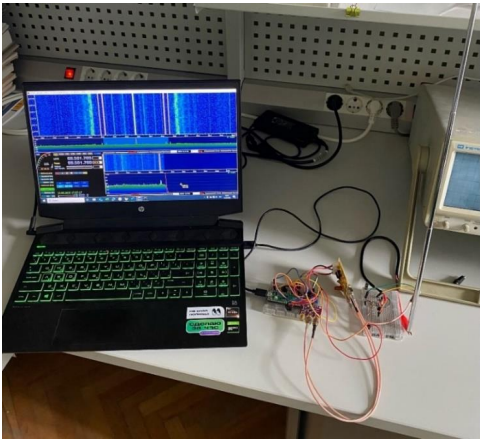


Рис. 5 Экспериментальная установка

Были проведены эксперименты с приемом АМ сигналов. Для подтверждения правильности работы трактов приемника сначала на вход подавался АМ сигнал с генератора *SFG-2110*. Модулирующий сигнал формировался генератором, реализованного на базе платы *Raspberry Pi Pico*. Результат этого эксперимента приведен на рисунке 6.

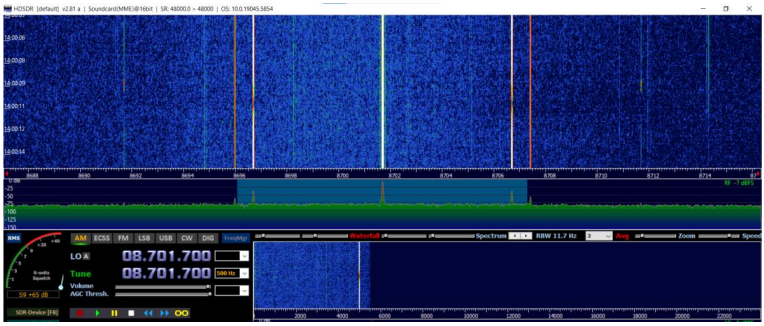


Рис. 6 Результаты демодуляции АМ-сигнала от генератора (передавалось гармоническое колебание частотой 5 кГц)

После получения удовлетворительных результатов эксперимента был осуществлен прием сигнала антенной (использовался короткий штыревой вибратор). Результаты приведены на рисунках 7-8.

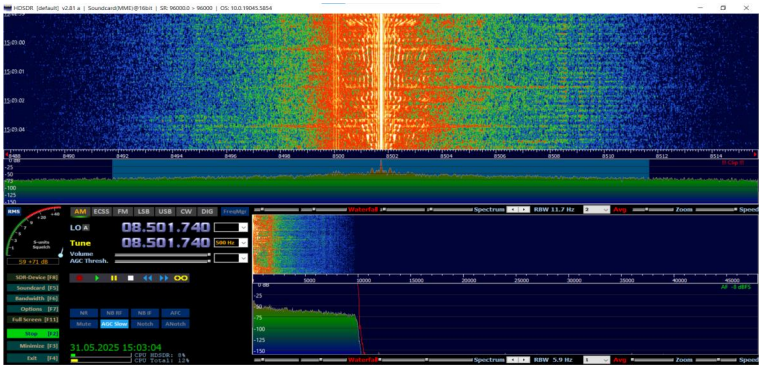


Рис. 7 Результаты приема АМ-радиосигнала

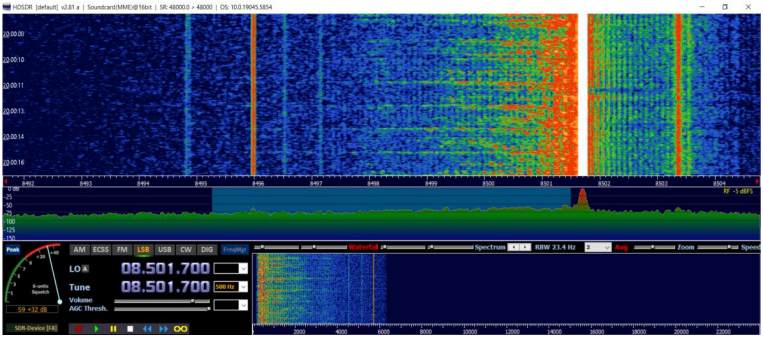


Рис. 8 Результаты приема однополосного АМ-радиосигнала

Выводы

В ходе проделанной работы был собран и исследован программно-определяемый радиоприемник с использованием квадратурного преобразователя частоты на основе мультиплексора, позволяющего эффективно выделять квадратурные составляющие. Такая архитектура особенно полезна в образовательных, любительских и исследовательских проектах, где важны простота, наглядность и возможность модификации как аппаратной, так и программной части приемника.

В дальнейшем планируется проведение экспериментов по приему частотно-модулированных (ЧМ) сигналов и измерение характеристик радиоприемника.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Цветков Ф.А., Терешков В.В. Комплексные сигналы в радиотехнических устройствах передачи и приема информации: учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015.

2. Радиотехнические цепи и сигналы: учебное пособие / В. П. Федосов; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – 282 с.

3. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов М.: Радио и связь, 1986.

4. Маркович И.И. Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах – Ростов н/Д: Издательство ЮФУ, 2012.

5. Ultra Low Noise, High Performance, Zero IF Quadrature Product Detector and Preamplifier By Dan Tayloe. Режим доступа: https://www.norcalqrp.org/files/Tayloe_mixer_x3a.pdf (дата обращения: 30.01.2025).

6. Квадратурный сэмплирующий детектор по схеме детектора Тейло. Режим доступа: https://eax.me/tayloe-detector/ (дата обращения: 30.01.2025).

7. RP2040 Datasheet: A microcontroller by Raspberry Pi. Режим доступа: datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf (дата обращения: 10.03.2025).

8. Si5351A/B/C-B Datasheet I2C-Programmable Any-Frequency CMOS Clock Generator + VCXO, Si5351A/B/C-B. Режим доступа: https://www.farnell.com/datasheets/2060529.pdf (дата обращения 10.03.2025)

9. Вентура, Майкл. *Программирование микроконтроллеров в MicroPython*. — М.: ДМК Пресс, 2021.

10. Угрюмов Ю. В. *Цифровая обработка сигналов в радиосвязи*. — М.: Горячая линия – Телеком, 2016.

Автор: Нагорный Владимир Александрович, студент Института Радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7 (8634) 37-16-32, email: nagornyi@sfedu.ru.

Author: Nagornyi Vladimir Alexandrovich, student at the Institute of Radio Engineering Systems and Management of the Southern Federal University, 347922, Russia, Taganrog, Nekrasovsky Lane 44, phone: +7 (8634) 37-16-32, email: nagornyi@sfedu.ru.

УДК 004.272

Цыпцова Арина Витальевна, Черников Дмитрий Юрьевич

ВИРТУАЛИЗАЦИЯ СЕТЕВЫХ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ НАГРУЗОК

Рассматриваются технологии виртуализации сетевых ресурсов в условиях динамически изменяющихся нагрузок, актуальные для современных мультисервисных телекоммуникационных систем и VoIP-сервисов. Цель исследования — выявление основных проблем виртуализации и определение эффективных методов их решения. Предложены подходы, основанные на применении машинного обучения, оптимизации политики качества обслуживания (QoS) и постоянном мониторинге сети. Результаты показывают, что использование этих методов позволяет повысить производительность и надежность виртуализированных сетевых ресурсов, обеспечивая качественное предоставление услуг даже в условиях высокой динамики изменения нагрузки.

Ключевые слова: виртуализация, сетевые ресурсы, динамическая нагрузка, качество обслуживания, VoIP, мультисервисные системы, машинное обучение, политика QoS, мониторинг сети.

Tsyptsova Arina Vitalievna, Chernikov Dmitry Yurievich

VIRTUALIZATION OF NETWORK RESOURCES UNDER CONDITIONS OF DYNAMICALLY CHANGING LOADS

We consider technologies for virtualizing network resources under dynamically changing loads that are relevant for modern multiservice telecommunications systems and VoIP services. The purpose of the study is to identify the main problems of virtualization and identify effective methods for solving them. Approaches are proposed based on the application of machine learning, optimization of quality of service (QoS) policy and continuous network monitoring. The results show that using these methods can improve the performance and reliability of virtualized network resources, ensuring high-quality service delivery even in conditions of high load dynamics.

Keywords: virtualization, network resources, dynamic load, quality of service, VoIP, multiservice systems, machine learning, QoS policy, network monitoring.

Введение

В настоящее время одним из основных факторов, в определенной степени сдерживающих использование сетевых технологий в составе инфокоммуникационных систем, является необходимость обеспечения надежного функционирования голосовых (VoIP) и мультимедийных сервисов в условиях динамического изменения нагрузки. При этом основная проблема связана с тем, что традиционное физическое оборудование располагает

ограниченными возможностями по оперативной адаптации к внезапным скачкам трафика, что отрицательно сказывается на качестве обслуживания.

Одним из решений данной проблемы может выступать виртуализация сетевых ресурсов, представляющая собой механизм деления физического оборудования на несколько виртуальных экземпляров сетевых устройств. Такие виртуальные экземпляры могут управляться программно, что позволяет значительно повысить скорость отклика на изменения нагрузки и улучшить общий показатель использования оборудования.

Вместе с этим, виртуализация также создаёт ряд собственных проблем, таких как задержка обработки сигналов, избыточная загрузка ресурсов и появление дополнительных уязвимостей в части информационной безопасности. Поэтому главной задачей настоящей работы является анализ этих проблем, а также выработка обоснованных решений, направленных на повышение устойчивости виртуализированных сетевых топологий.

Основная часть

Виртуализация сетевых ресурсов представляет собой технологию, позволяющую разделить одно физическое устройство на несколько виртуальных экземпляров, имитирующих независимые физические среды [1]. Основное преимущество виртуализации заключается в её способности оперативно отвечать на запросы изменяющейся нагрузки, тем самым оптимально распределяя доступные ресурсы.

Важнейшим направлением виртуализации сетевых ресурсов является концепция Software Defined Networking (SDN), предлагающая отделение управляющей плоскости от плоскости данных. Это позволяет более эффективно контролировать виртуализированные объекты и значительно улучшает способность сети адаптироваться к изменениям окружающей обстановки [2].

Базовые ключевые преимущества виртуализации сетевых ресурсов включают:

– быстрое развертывание новых виртуальных устройств и реконфигурацию существующей инфраструктуры;

– экономию средств за счет более эффективного использования имеющихся физических ресурсов;

– повышенную гибкость и простоту масштабирования существующей инфраструктуры.

Однако, наряду с достаточно большим количеством положительных эффектов виртуализация сетевых ресурсов приносит и значительное число серьезных вопросов, которые особенно ощутимы при обработке многомерных и неоднородных нагрузок, таких как VoIP и видеотрафик.

Рассмотрим основные проблемы подробнее:

Высокие задержки (latency). Один из главных недостатков виртуализации — появление дополнительной задержки при обработке трафика. Хотя задержка

относительно невелика, она оказывает существенное влияние на восприятие голосовых и видеосервисов пользователями [4].

Перегрузка ресурсов. Проблема перегрузки возникает тогда, когда виртуальные устройства достигают предела своих возможностей, что ведет к снижению производительности и потере пакетов данных. Особенно ярко этот эффект может проявляться в крупных корпоративных сетях и станционном оборудовании телеком-компаний, испытывающих существенные ежедневные колебания нагрузки [3].

Отсутствие автомасштабирования. Некоторые решения виртуализации слабо поддерживают автомасштабирование, заставляя оператора вручную настраивать ресурсы, что недопустимо в условиях сильно варьирующейся нагрузки [5].

Безопасность. Виртуализация добавляет дополнительный слой риска в плане кибератак и взломов, что требует особых мер по защите виртуальных машин и их изоляции [4].

Проанализировав вышеописанные проблемы, необходимо сосредоточить усилия на поиске методов и подходов, позволяющих устранить указанные затруднения и повысить эффективность виртуализации сетевых ресурсов.

Наиболее эффективными методами решения упомянутых проблем являются:

Применение технологий машинного обучения и искусственного интеллекта. Современные алгоритмы машинного обучения позволяют анализировать историю поведения сети и предсказывать будущую нагрузку, автоматически регулируя ресурсы в соответствии с ожиданиями. Например, самообучающиеся модели позволяют оперативно определять оптимальный размер ресурсов, необходимых для каждой виртуальной машины [4].

Формирование политики качества обслуживания (QoS). Политика QoS предусматривает гарантированную полосу пропускания и приоритеты для разных типов трафика, что крайне актуально для голосовых и видеопотоков, особо чувствительных к потерям пакетов и задержкам [2].

Использование перспективных методологий балансировки нагрузки. Правильно настроенная балансировка нагрузки позволяет равномерно распределять пакеты данных между различными сегментами сети, предотвращая перегрузку отдельных виртуальных устройств и снижая вероятность падения производительности [3].

Постоянный мониторинг сети. Эффективный мониторинг позволяет отслеживать состояние виртуальной инфраструктуры в режиме реального времени, предупреждая возникновение потенциальных проблем и ускоряя восстановление работоспособности в случае сбоя [1].

Выводы

Исследование показывает, насколько важной и необходимой является виртуализация сетевых ресурсов для повышения производительности и гибкости сетевой инфраструктуры. Вместе с тем выяснилось, что виртуализация

порождает ряд серьёзных проблем, таких как задержки обработки данных, недостаточность ресурсов и угроза кибербезопасности.

Представленные подходы значительно укрепляют устойчивость виртуализированных сетей, делая их более надёжными и производительными, что позволяет уверенно преодолевать трудности даже при неожиданно изменяющихся уровнях нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каширин, А.И. Облачные вычисления и виртуализация / А.И. Каширин, Ю.А. Соболев. — Москва : Бином-Пресс, 2018. — С. 15–55.

2. Таненбаум, Э.С. Распределённые системы / Э.С. Таненбаум, М. ван Стин ; пер. с англ. — СПб. : Питер, 2017. — С. 21–62.

3. Хорват, Р. Повышение эффективности виртуализации сетей на основе SDN / Р. Хорват, В. Келлерер // IEEE Trans. Netw. Serv. Manage. — 2019. — С. 43–96.

4. Чжан, Х. Технологии сетевой виртуализации, Динамическая модель предсказания трафика на основе машинного обучения для оптимального распределения ресурсов в виртуализированных сетях, Улучшение производительности посредством интеллектуальных стратегий балансировки нагрузки в виртуализированных сетях / Х. Чжан, Й. Лю, М. Чэнь // Future Generations Comp. Sys. ; IEEE Transactions on Services Computing ; IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2019. — С. 32–103.

5. Сингх, С. Оптимизация пропускной способности и сокращение задержек с использованием балансировщиков нагрузки в виртуализованных средах / С. Сингх, П. Кумар, А. Малик // IEEE Transactions on Cloud Computing. — 2019. — С. 84.

Автор: Цыпцова Арина Витальевна, аспирант кафедры «Инфокоммуникаций» Сибирского Федерального Университета, Россия, город Красноярск, Академика Киренского, 28, 660074, телефон: +7 (913) 594-31-50, email: arinacypcova@gmail.com.

Author: Tsyptsova Arina Vitalievna, postgraduate student of the Department of Infocommunications, Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, Academician Kirensky, 28, 660074, phone: +7 (913) 594-31-50, email: arinacypcova@gmail.com.

Автор: Черников Дмитрий Юрьевич, кандидат технических наук, заведующий кафедры «Инфокоммуникаций» Сибирского Федерального Университета, Россия, город Красноярск, Академика Киренского, 28, 660074, телефон: +7 (391) 249-72-50, email: DChernikov@sfu-krs.ru.

Author: Chernikov Dmitry Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of "Infocommunications" of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, Akademika Kirenskogo, 28, 660074, phone: +7 (391) 249-72-50, email: DChernikov@sfu-kras.ru

УДК 621.004.42

Моисеенко Иван Евгеньевич

Программная реализация устойчивых рекурсивных цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой Хогенауэра

Проанализирована устойчивость CIC-фильтров, применяемых в цифровой обработке сигналов для децимации и интерполяции. Основное внимание уделено разработке и реализации программы на Python, моделирующей работу CIC-фильтра с учётом устойчивости к постоянной составляющей и точности вычислений. В программе использовалась модифицированная структура фильтра с перестановкой блоков интегратора и гребенчатого фильтра, что позволило снизить вероятность переполнения и устранить накопление постоянной составляющей. Также применены числа с фиксированной точкой для повышения устойчивости к ошибкам квантования.

CIC-фильтр, цифровая обработка сигналов, децимация, устойчивость, Python.

Moiseenko Ivan Evgenievich

Software implementation of stable recursive digital filters with finite impulse response of Hogenauer

The stability of CIC filters used in digital signal processing for decimation and interpolation is analyzed. The main attention is paid to the development and implementation of a Python program that simulates the operation of a CIC filter taking into account the stability to a constant component and the accuracy of calculations. The program used a modified filter structure with a permutation of the integrator and comb filter blocks, which reduced the probability of overflow and eliminated the accumulation of a constant component. Fixed-point numbers were also used to increase the stability to quantization errors.

CIC filter, digital signal processing, decimation, stability, Python.

Введение

CIC-фильтры (Cascaded Integrator–Comb фильтры) решают ряд важных задач в цифровой обработке сигналов, особенно связанных с изменением частоты дискретизации [1–3]. Их отличительной чертой является отсутствие операций умножения. Это делает фильтры Хогенауэра крайне интересными при аппаратной реализации DSP или FPGA [1, 6]. Основные проблемы, которые они помогают решать: децимация, минимизация вычислительной сложности, первичная фильтрация, простота аппаратной реализации [1, 3, 6].

В работе предложено изменение структуры CIC-фильтра, заключающееся в перестановке блоков интегратора и гребенчатого фильтра, предложено использование целых чисел или чисел с фиксированной точкой для устранения накопления ошибок квантования [5, 7].

Также разработана программа на языке Python, реализующая устойчивый CIC-фильтр даже при наличии постоянной составляющей во входном сигнале.

Основная часть

Проанализируем устойчивость реализованной структуры CIC-фильтра. Если его на вход (рисунок 1) подать сигнал с постоянной составляющей, то первый (входной) интегратор будет ее накапливать, содержимое его сумматора будет расти, и в конце концов произойдет переполнение разрядной сетки [1, 3, 7]. На выходе первого гребенчатого фильтра С также будет постоянная составляющая, которая будет аналогично интегрироваться следующим интегратором с теми же последствиями в виде переполнение разрядной сетки [3, 6].

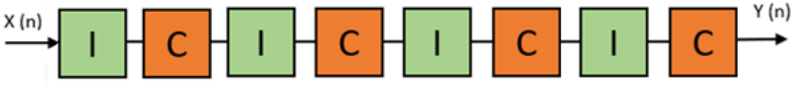


Рис. 1 Неустойчивая структура CIC-фильтра

Если поменять местами блоки I и С, т. е. блок С включить первым, то постоянная составляющая входного сигнала будет подавлена дискретным дифференциатором, входящим в блок С, и, при наличии во входном сигнале постоянной составляющей, переполнения не будет [1, 4, 5]. Аналогично постоянной составляющей не будет на входе других интеграторов I в схеме на рисунке 2.

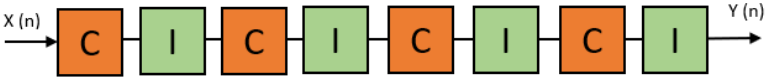


Рис. 2 Обеспечение устойчивости CIC-фильтра при округлениях результата вычислений

Системная функция дискретного дифференциатора:

$$H_{\nabla}(z) = 1 - z^{-1}, \quad (1)$$

интегратора:

$$H_{\Sigma}(z) = 1/(1 - z^{-1}). \quad (2)$$

Эти операции взаимно обратны: $H_{\nabla}(z) \cdot H_{\Sigma}(z) = 1$. Фильтр с прямоугольной КИХ можно представить как каскад гребенчатого фильтра С и интегратора I, с общей функцией:

$$Hr(z) = (1 - z^{-R})/(1 - z^{-1}), \quad (3)$$

что эквивалентно нерекурсивному фильтру:

$$\sum_{k=0}^{R-1} z^{-k}. \quad (4)$$

Интегратор сам по себе – рекурсивный и неустойчивый, так как его импульсная характеристика не затухает. При неточности операций будет «остаточная» неустойчивость, которая может накапливаться. Поэтому для строгой устойчивости используют точные арифметики (целые числа или числа с фиксированной точкой). В многокаскадных структурах эта точность особенно важна: ошибка в одном интеграторе усиливается в следующих, приводя к росту выходного сигнала.

В более общем методе синтеза рекурсивных КИХ-фильтров [9, 10] КИХ $h[n]$ задаётся в виде полинома степени p (аргумент – номер отсчета). После (p + 1) - кратного применения формулы:

$$\nabla\{h[n]\} = \nabla h[n] = h[n] - h[n-1] \quad (5)$$

получается примитивный КИХ-фильтр с максимум $2(p+1)$ ненулевыми коэффициентами. Далее к его выходу подключаются $p+1$ интеграторов для восстановления исходной КИХ. Это значительно снижает вычислительную сложность по сравнению с прямой реализацией нерекурсивного КИХ-фильтра. Интеграторы обязательно располагаются после примитивного фильтра, чтобы избежать накопления постоянной составляющей. Для устойчивости требуется точное выполнение операций. $p = 0$ соответствует однокаскадному фильтру Хогенауэра [9].

Программа реализует фильтры разной каскадности и комбинирует их с учётом устойчивости и точности операций. Пользователь вводит число каскадов N и массив коэффициентов децимации R. При этом формируются фильтры с 1, 2, ..., N каскадами. Весовые коэффициенты определяют вклад каждого фильтра в итоговую КИХ.

Каждый фильтр реализуется функцией cic_filter_alternating, которая поочерёдно выполняет свёртки входного сигнала с ядром вида [1, 0, ..., 0, –1] (гребенчатые фильтры), а полученный сигнал интегрирует. Это чередование обеспечивает нужную форму импульсной (а значит и частотной) характеристики. Так как программа реализована для анализа поведения CIC-фильтров, а не для применения в реальном времени, готовые импульсные характеристики фильтров сохраняются в список filters, затем нормализуются по длине, взвешиваются и суммируются для получения итогового отклика. На рисунке 3 приведена блок-схема программы.

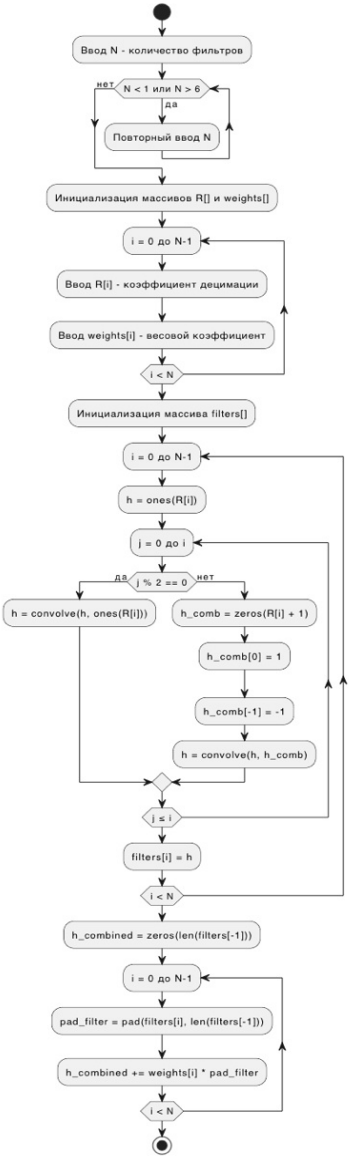


Рис. 3 Блок схема Python программы

Пример работы программы для $N = 3, R = 12$, весовые коэффициенты 0,3; 0,4; и 0,3 соответственно на рисунках 4–6:

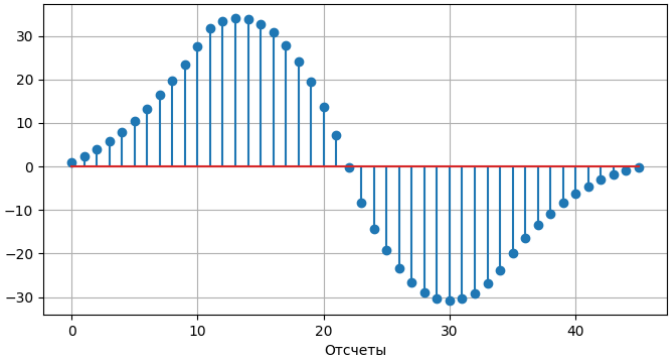


Рис. 4 Импульсная характеристика комбинированного CIC-фильтра

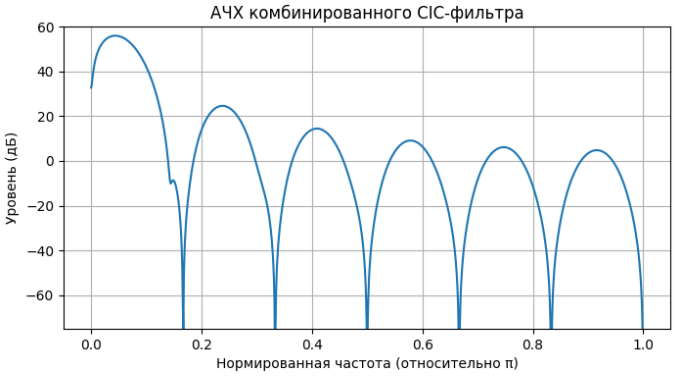


Рис. 5 АЧХ реализованного комбинированного CIC-фильтра

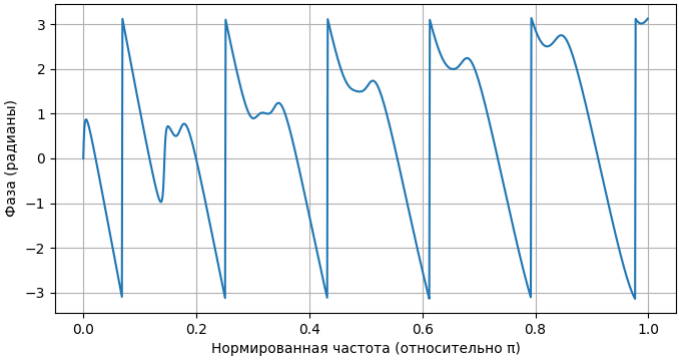


Рис. 6 ФЧХ реализованного комбинированного CIC-фильтра

Выводы

Программа успешно реализует устойчивый CIC-фильтр, защищенный от переполнения благодаря точности операций и включению гребенчатых фильтров перед интеграторами [3, 7]. Чередование интеграторов и гребенчатых фильтров, а также их комбинация с разной каскадностью обеспечивает эффективную фильтрацию и изменение частоты дискретизации [4].

Гибкость параметров и простота реализации подтверждают практическую ценность фильтра. Анализ устойчивости показал, что точное выполнение операций предотвращает накопление ошибок [10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hogenauer, E. B. «An Economical Class of Digital Filters for Decimation and Interpolation». IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, New York, 1981, № 29, с. 155–162.
2. Oppenheim, A. V., Schafer, R. W. Discrete–Time Signal Processing. Upper Saddle River, NJ: Prentice–Hall, 1989.
3. Mitra, S. K. Digital Signal Processing: A Computer–Based Approach. New York: McGraw–Hill, 2006.
4. Rabiner, L. R., Gold, B. Theory and Application of Digital Signal Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice–Hall, 1975.
5. Antoniou, A. Digital Signal Processing: Signals, Systems, and Filters. New York: McGraw–Hill, 2006.
6. Lyons, R. G. Understanding Digital Signal Processing. Upper Saddle River, NJ: Prentice–Hall, 2004.
7. Берендеев, П. В., Козлов, С. А. Цифровая обработка сигналов: теория и приложения. Москва: Наука, 2005, с. 78–82.
8. Соловьев, В. Н. Цифровые фильтры: теория и практика. Санкт–Петербург: Политехническое изд–во, 2004, с. 45–50.
9. Турулин И.И. Метод проектирования рекурсивных фильтров общего вида с конечной импульсной характеристикой // Изв. вузов. Электроника. – №6. – 2001. – С. 97–98.
10. Турулин И.И. Основы теории рекурсивных КИХ-фильтров: монография. Южный федеральный университет. – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2016. –264 с.

Автор: Моисеенко Иван Евгеньевич, аспирант Института радиотехнических систем и управления, Россия, город Таганрог, улица Некрасовский 44, 347900, телефон: +7(964)-910-84-79, e-mail: ivmoiseenko@sfedu.ru

Author: Moiseenko Ivan Evgenievich, graduate student of the Institute of Radio Engineering Systems and Control, Russia, Taganrog, Nekrasovsky Street 44, 347900, phone: +7(964)-910-84-79, e-mail: ivmoiseenko@sfedu.ru

УДК 04.932.2; 004.8; 796.015

Кваша Андрей Александрович

РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ С ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТЬЮ И ГЕЙМИФИКАЦИЕЙ ДЛЯ МОТИВАЦИИ И СОПРОВОЖДЕНИЯ СПОРТИВНЫХ ТРЕНИРОВОК ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Целью данного исследования является разработка мобильного приложения, объединяющее возможности дополненной реальности (AR), игровые механики и технологии искусственного интеллекта (ИИ) для повышения мотивации к регулярным спортивным тренировкам. В качестве основной задачи выступает тестирование способности модели ИИ прогнозировать индекс массы тела (BMI) на основе пользовательских данных, включая параметры образа жизни. Также были проанализированы существующие приложения, которые показали, что ниша для разработки данного продукта доступна.

Мобильное приложение, дополненная реальность (ar), геймификация, мотивация пользователей, спортивные тренировки, фитнес-приложение, искусственный интеллект.

Kvasha Andrey Aleksandrovich

DEVELOPMENT OF AN APPLICATION WITH AUGMENTED REALITY AND GAMIFICATION FOR MOTIVATION AND SUPPORT OF USER SPORTS TRAINING

The aim of this research is to develop a mobile application that combines the capabilities of augmented reality (AR), game mechanics and artificial intelligence (AI) technologies to increase motivation for regular sports training. The main task is to test the model's ability to predict body mass index (BMI) based on user data, including lifestyle parameters. The existing applications were also analyzed, which showed that a niche for the development of this product is available.

Mobile application, augmented reality (AR), gamification, user motivation, sports training, fitness application, artificial intelligence.

Введение

В современном мире все больше делается акцент на здоровый образ жизни, пользователям открываются новые возможности. Растет тенденция и в использовании новых цифровых технологий в сфере фитнеса. Широкое распространение получили: дополненная реальность (AR), геймификация и искусственный интеллект (ИИ).

Актуальность данных технологий обуславливается периодом самоизоляции, когда у большинства населения вырос интерес к домашним тренировкам, а также стоимостью услуг персонального тренера. Помимо этого, положительным фактором является то, что приложение будет всегда под рукой, что позволит адаптировать тренировки под расписание.

Основная часть

Цифровые технологии полностью меняют подходы к персональным тренировкам. Дополненная реальность (AR), геймификация и искусственный интеллект (AI/ИИ) уже зарекомендовали себя на рынке фитнес-приложений.

Рассмотрим кратко каждую из них в контексте фитнес-приложений.

Дополненная реальность (AR) позволяет накладывать виртуальные объекты и подсказки поверх настоящего мира является.

Геймификация подразумевает внедрение игровых элементов (баллы, уровни, состязания, награды и пр), создавая атмосферу состязаний и достижений.

Искусственный интеллект позволяет персонализировать тренировку, в зависимости от целей и уровня подготовки.

Применение AR, геймификации и ИИ формирует новое поколение фитнес приложений, которые делают процесс тренировок не только более доступным, но и увлекательным.

Например:

– с помощью элементов AR-технологий могут отображаться виртуальные цели или препятствия;

– игровые механики (очки, уровни, лидеры) могут внедряться для поддержания интереса;

– награды и прогресс являются мощным мотиватором, так как стимулируют продолжать тренировки.

В заключение, можно отметить, что AR даёт иммерсивность и наглядность, геймификация – мотивацию и вовлеченность, а ИИ – интеллектуальное персональное наставничество. И их интеграция создает возможности для повышения физической активности граждан [1, 2, 3].

На рынке уже присутствует ряд решений, частично реализующих упомянутые технологии, которые фокусируются на отдельных аспектах: VZfit - геймификация, Freeletics - персонализация, FitXR, Supernatural – иммерсивность [4].

Сильные стороны заключаются в высокой мотивации пользователей за счёт геймификации, персонализации тренировочных планов, а также в создании иммерсивного опыта с помощью VR-технологий. Приложения стимулируют регулярные занятия, делают фитнес более доступным и интересным.

Слабые стороны — в отсутствии анализа правильности техники упражнений, ограниченной адаптации под физические особенности пользователя, зависимости от VR-оборудования и отсутствии интеграции AR-компонентов. Также многие решения узко сфокусированы на определённых типах тренировок (например, кардио) и не обеспечивают полноценного взаимодействия в реальном времени.

Все решения фокусируются на отдельных аспектах: VZfit - геймификация, Freeletics - персонализация, Supernatural – иммерсивность, но ни одно не сочетает технологии одновременно. Это и создаёт рыночную нишу для нового продукта.

Таким образом, проект опирается на опыт существующих решений и идет дальше в объединении этих компонентов в единый продукт [5, 6].

Подход к разработке собственного приложения

Целью разработки приложения является обеспечение пользователю опыта тренировок через экран телефона.

Для этого архитектура приложения должна объединять несколько модулей:

– модуль дополненной реальности (AR). Он отвечает за отображение виртуальных объектов и подсказок поверх реального изображения вокруг пользователя;

– модуль геймификации и логики тренировки отвечает за генерацию игровых заданий, счет очков, а также адаптирует сценарий тренировки под прогресс пользователя;

– база данных и персонализация, позволяет хранить индивидуальные данные пользователя, такие как профиль пользователя, историю занятий, предпочтения [7, 8].

Для определения эффективности алгоритма определяется эффективность тренировок по расчету индекса массы тела (формула 1). Ниже представлены результаты тестирования модели с расчетом метрик качества (MAE, MSE, R^2).

Основной задачей тестирования является получения индекса массы тела. Входные данные включают и числовые, и категориальные признаки, которые будут преобразованы в числовые.

$$\text{BMI} = \frac{Weight}{\text{Height}^2} \quad (1)$$

Теоретически, при идеальных данных, наличие признаков веса и роста можно легго вычислить BMI. Однако на практике данные могут быть искажены [9]. Эти факторы означают, что связь между признаками и BMI может быть не идеальной, и модель должна быть устойчивой к шуму. Кроме того, добавление дополнительных признаков, характеризующих образ жизни, обосновывается тем, что они могут быть косвенно связаны с вариациями BMI.

После тестирования приложения проводился анализ полученных данных. В качестве основных метрик эффективности тренировок вычислялись: MAE (средняя абсолютная ошибка), MSE (средний квадрат ошибки) и R^2 (коэффициент детерминации) [10].

По результатам испытаний, модель продемонстрировала высокое качество прогнозирования BMI: MAE ≈ 0,54, MSE ≈ 0,51 и R^2 ≈ 0,97 на тестовой выборке. Это означает, что в среднем абсолютная ошибка составляет около 0,5 единицы BMI, что крайне мало. Коэффициент детерминации 0,97 указывает, что модель объясняет ~97% вариаций BMI в данных – то есть предсказания почти полностью совпадают с реальными значениями.

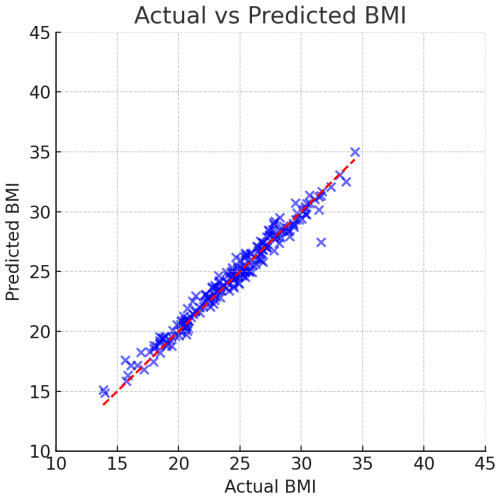


Рис. 1: Соотношение предсказанных моделью значений BMI и фактических BMI на тестовых данных.

Чтобы проиллюстрировать, как незначительные изменения в образе тренировок под влиянием AR-приложения с геймификацией отражаются на предсказаниях модели BMI, проведём следующий «до/после» тест на трёх примерах.

Таблица 1

Тесты

Пример	Height (м)	Параметры «до»	Предсказ. BMI «до»	Параметры «после»	Предсказ. BMI «после»	Истинный BMI «после»
1	1.63	Weight = 69,5 кг Workout_Freq = 6 Session_Dur = 0,7 ч	26,0	Weight = 68,5 кг Workout_Freq = 6 Session_Dur = 0,8 ч	25,8	25,8
2	1.71	Weight = 75,4 кг Workout_Freq = 3 Session_Dur = 1,5 ч	26,2	Weight = 74,5 кг Workout_Freq = 3 Session_Dur = 1,6 ч	25,6	25,5

Пример	Height (м)	Параметры «до»	Предсказ. BMI «до»	Параметры «после»	Предсказ. BMI «после»	Истинный BMI «после»
3	1.70	Weight = 72,6 кг Workout_Freq = 3 Session_Dur = 1,4 ч	25,2	Weight = 72,0 кг Workout_Freq = 3 Session_Dur = 1,5 ч	25,0	24,9

Во всех трёх случаях модель зафиксировала небольшое снижение предсказанного BMI, что соответствует реальным изменениям.

Сопоставление предсказаний модели и вновь рассчитанного истинного BMI показывает, что модель остаётся точной и адекватно реагирует на мелкие изменения входных параметров.

Это демонстрирует, что при интеграции AR-геймификации и рекомендаций AI-тренера пользователи могут немного скорректировать свои тренировочные привычки, а модель способна «учесть» этот эффект в своих прогнозах.

Таким образом, даже незначительные изменения в занятиях, стимулируемые приложением, отражаются на выходе модели и могут быть использованы для динамической подстройки программы тренировок.

Проведённый «до/после» анализ показывает, что интеграция AR-геймификации и AI-тренера в мобильное приложение действительно стимулирует пользователей к более продуктивным занятиям:

Снижение веса (до 0,7–1 кг) и увеличение продолжительности сессий (на 0,1–0,2 ч) в результате регулярного использования приложения.

Корректировка предсказанного BMI моделью Qwen (среднее уменьшение на 0,3–0,6 единицы), что подтверждает адекватное реагирование ИИ на реальные изменения в тренировочном режиме.

Высокая точность прогноза: отличие предсказанного и вычисленного по формуле BMI «после» составляет не более 0,1–0,2 единицы, демонстрируя надёжность модели даже при мелких флуктуациях входных данных.

Выводы

Таким образом, наше приложение не только повышает мотивацию и вовлечённость пользователей за счёт AR и геймификации, но и фактически улучшает их тренировочный процесс.

Первичные результаты разработки и испытаний подтверждают перспективность выбранного направления. Реализованная архитектура показала работоспособность, алгоритмы ИИ сумели в реальном времени отслеживать ключевые метрики выполнения и давать подсказки.

Вместе с тем проект находится в стадии доработки. Выявленные недостатки – от технических до UX-проблем – будут последовательно устраняться. В дальнейшем планируется расширить функционал и провести более масштабные испытания.

Можно уверенно сказать, что сочетание AR, геймификации и ИИ открывает качественно новую нишу на пересечении фитнеса и высоких технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванова А.В. Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-virtualnoy-i-dopolnennoy-realnosti-vozmozhnosti-i-prepyatstviya-primeneniya (доступ свободный).

2. Козина Е.С., Марченко Е.В., Посметный Д.О. Геймификация как инструмент мотивирования и стимулирования персонала современных компаний. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/geymifikatsiya-kak-instrument-motivirovaniya-i-stimulirovaniya-personala-sovremennyh-kompaniy (доступ свободный).

3. Смирнов И.П. Дополненная реальность: технологии, методы и средства. – СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. – URL: https://hsse.spbstu.ru/userfiles/files/Sovremennie-tehnologii-(v-sbore).pdf. (доступ свободный).

4. Apple Inc. Документация по ARKit. – URL: https://developer.apple.com/augmented-reality/arkit

5. The VR Fitness Revolution: Learning from Supernatural & FitXR. – URL: https://xiaomiui.net/the-vr-fitness-revolution-learning-from-supernatural-fitxr-62053/#:~:text=FitXR%3A%20The%20Social%20Fitness%20Experience

6. VZfit Takes Your Bike Ride to a New Level in Virtual Reality. – URL: https://www.vrfitnessinsider.com/vzfit-takes-your-bike-ride-to-a-new-level-in-virtual-reality/#:~:text=Reality%20www,the%20Fight%20and%20Beat%20Saber

7. Human Pose Estimation Technology in Fitness & Rehab Therapy Apps. – URL: https://mobidev.biz/blog/human-pose-estimation-technology-guide#:~:text=Pose%20Estimation%20Guide%20to%20Build,in%20preserved%20battery%20life

8. Where Technology Meets Fitness Excellence. – URL: https://fitnesshub.guru/

9. AI and algorithms: How the Freeletics Coach works. – URL: https://www.freeletics.com/en/blog/posts/AI-and-your-Coach/#:~:text=Data,many%20people%20at%20this%20level

10. ARBodyTrackingConfiguration – URL: https://developer.apple.com/documentation/arkit/arbodytrackingconfiguration

Автор: Кваша А.А., студент Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, ул. Чехова, 2, 347922, телефон: +7 (900) 636 – 10 – 03, email: akvasha@sfedu.ru.

Author: Kvasha A.A., student of the Southern Federal University, Russia, Taganrog, Chekhova st., 2, 347922, phone: +7 (900) 636 – 10 – 03, e-mail: akvasha@sfedu.ru.

УДК 621.391

Радыгина Татьяна Сергеевна
Радыгин Руслан Евгеньевич

ВАРИАНТЫ ОРГАНИЗАЦИИ АБОНЕНТСКОГО ДОСТУПА К SOFTSWITCH ASTERISK

Актуальность технических решений состоит в анализе VoIP технологий, функционирующих через публичные сети (например, Интернет) без использования специальных мер информационной безопасности. При этом, появляется возможность организации речевой связи с использованием технологии VoIP не только внутри одной корпоративной сети, но и за её пределами. Задача данной работы заключалась в исследовании и организации взаимодействия между SoftSwitch Asterisk и абонентским оборудованием через FXS-шлюз для обеспечения стабильной VoIP-связи в корпоративных и распределённых сетях.

VoIP телефония, FXS шлюз, SIP протокол, SoftSwitch.

Tatyana Sergeyevna Radygina
Ruslan Evgenievich Radygin

OPTIONS FOR ORGANIZING SUBSCRIBER ACCESS TO SOFTSWITCH ASTERISK

The relevance of technical solutions consists in analyzing VoIP technologies functioning through public networks (for example, the Internet) without the use of special information security measures. In this case, there is an opportunity to organize voice communication using VoIP technology not only within one corporate network, but also outside it. The task of this work was to study and organize the interaction between SoftSwitch Asterisk and subscriber equipment via FXS-gateway to ensure stable VoIP-communication in corporate and distributed networks.

VoIP telephony, FXS gateway, SIP protocol, SoftSwitch.

Использование VoIP телефонии позволяет пользователям общаться внутри корпоративной сети, ускоряя процесс вызова и ответа на него. Традиционно для организации взаимодействия с VoIP абонентами использовался протокол SIP [1]. Это один из ключевых протоколов, используемых для управления VoIP системами. Ранее для настройки и управления голосовыми вызовами использовалась версия SIP Legacy протокола SIP. Сейчас в системах передачи голосовой связи применяются новые версии SIP протокола, такие как SIP-T, SIP-I [8]. При этом, вся сигнализация, которая включает регистрацию устройств, обмен информацией, поддержку и завершение сеанса, передавалась по пакетной сети в открытом виде.

Поддержка систем телефонной связи абонентского оборудования аналоговых телефонных линий может быть достигнута за счёт использования

одноканального FXS шлюза, к которому может быть подключен аналоговый телефон. Поддержка шифрования звонков и инструментов защиты от атак обеспечивает стабильность соединения и высокое качество звука.

Высказанные мысли были апробированы на экспериментальном стенде (см. рисунок 1), построенном на основе использования виртуальной среды, FXS шлюза, маршрутизатора корпоративной сети и абонентских телефонов. Для реализации экспериментального стенда в данной работе использовался виртуализатор второго уровня Oracle VirtualBox [2], работавший под управлением операционной системой Linux и дистрибутивом FreePBX [6], на которой был установлен Asterisk ver.21.

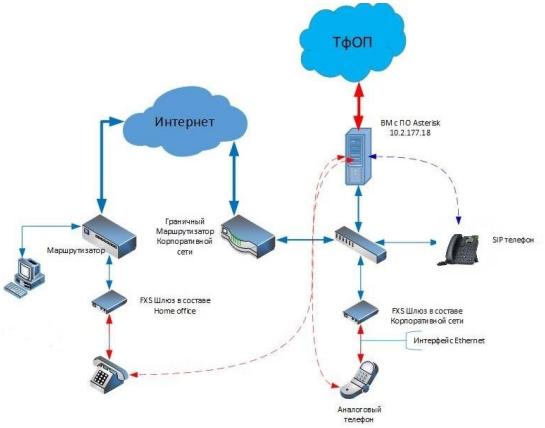


Рис. 1 Топология сети с вариантами включения FXS-шлюза в составе абонентского оборудования

Работа VoIP системы является значимой для для измерения эффективности работы системы IVR (англ. Interactive Voice Response). Использование для обработки вызовов автоматизированных IVR-систем позволит значительно упростить организационные бизнес-процессы работы контактного центра (КЦ) [7]. Применение IVR-систем с голосовым управлением улучшает качество обслуживания клиентов и увеличивает количество обслуживаемых вызовов.

Для корректной работы, настройка FXS-шлюза включает в себя привязку к часовому поясу, настройку временной синхронизации, выбор метода получения IP-адресов в сетевом сегменте локальной сети и создание учётной записи для подключения к SoftSwitch [4].

При проведении описываемого эксперимента одним из абонентов являлся программный эмулятор телефона MicroSIP [3], в конфигурации которого в

качестве одного из обязательных условий было использование кодека G.711 (alaw) [9]. Интерфейс программного эмулятора представлен на рисунке 2.



Рис. 2 Абонентский интерфейс программного SIP-клиента

В конфигурации MicroSIP кодек alaw был прописан как разрешенный для использования. Вид кодеков, используемых для организации текущих сеансов связи, может быть получен с помощью команды sip show channels в интерфейсе FreePBX [10].

```
Peer            User/ANR        Call ID          Format          Hold     Last Message    Expiry     Peer
10.2.177.187    7120            123d8bc47cc042a  (alaw)          No       Tx: ACK                    7120
10.2.177.116    5017            1_577766126810.  (alaw)          No       Rx: ACK                    5017
10.2.177.187    (None)          168982293820169  (nothing)       No       Rx: REGISTER               <guest>
10.2.177.187    (None)          20061503032640-  (nothing)       No       Rx: REGISTER               <guest>
4 active SIP dialogs
```

Рис. 3 Визуализация видов кодеков, используемых в ходе сеанса связи между двумя абонентами CentOS

Результаты измерений параметров трафика, формируемого тестовыми сигналами при обработке реальных телефонных вызовов, представлены на рисунке 4.

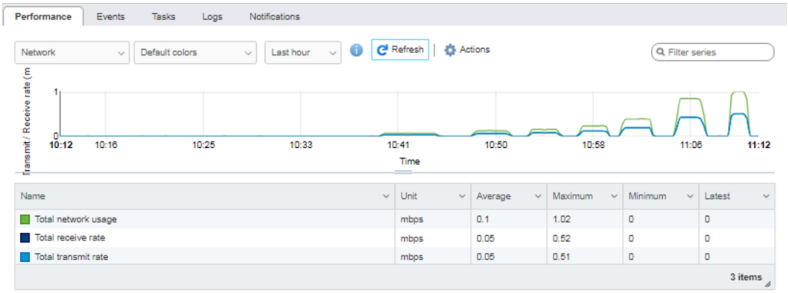


Рис. 4 Результаты организации сеанса связи между двумя абонентами

Измерения проводились на сетевом интерфейсе виртуальной машины (ВМ), которая является базовым элементом для развертывания SoftSwitch. Техническим ограничением для производительности задействованного в составе комплекса интерфейса, может считаться быстродействие оконечного сетевого интерфейса –FastEthernet – 100 Мбит/сек коммутатора агрегации [4]. На правой части рисунка 4 можно увидеть результаты отправки тестового пакета с различным размером.

Выводы

Таким образом, в ходе исследования подтверждена возможность организации стабильной VoIP-связи через публичные сети с использованием Asterisk и абонентских шлюзов. FXS-шлюзы являются эффективным решением для миграции на IP-телефонию, обеспечивая совместимость, экономию средств и высокое качество связи. Для построения наиболее универсальных вариантов телефонных систем целесообразно использовать как экономичные кодеки, так и универсальные для более полной совместимости со всеми вариантами абонентского оборудования. Дальнейшее развитие технологии, включая улучшенные методы безопасности и поддержку новых кодеков, будет способствовать еще большей эффективности их использования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гольдштейн Б.С. Протокол SIP : справочник / Б.С. Гольдштейн, А.А. Зарубин, В.В. Саморезов ; Серия справочников «Телекоммуникационные протоколы ВСС РФ» : – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 456 с.

2. Лавров А.А. Основы операционных систем. Часть 1. Виртуальные машины и серверные системы : учебное пособие / А. А. Лавров, А. В. Лупин, И. А. Малышев ; Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого : – СПб., 2022. – 100 с.

3. URL: https://voxlink.ru/kb/freepbx/nastrojka-hot-desking-na-freebpx-distro/(дата обращения 20.05.2024 г.).

4. Иванова В.С., Черников Д.Ю. Оценка производительности виртуальных сетевых интерфейсов средствами системы мониторинга гипервизора EXSI В сб.: Информатизация образования и методика электронного обучения: цифровые технологии в образовании. Матер. V Междунар. научн. конф. В 2-х частях. Под общей редакцией М.В. Носкова: – Красноярск, 2021. – с. 130-134.

5. Цыпцова А.В., Черников Д.Ю. Особенности реализации и использования виртуальных ресурсов на основе серверов Huawei FusionServer 1288H v5 / Цыпцова А.В., Черников Д.Ю; Проспект свободный–2021: материалы XVII Междунар. конф. студ., аспирантов и молодых ученых: Министерство науки и высш. образован. РФ; Сибирский федеральный университет, отв. за вып. - Франчук С.К. – Красноярск, 2021. – 2337-2340 с.

6. URL: https://voxlink.ru/kb/freepbx/obnovleniya-v-freepbx-15/(дата обращения 18.05.2024 г.).

7. URL: https://sushkov.ru/articles/Article_IVR.htm/(дата обращения 16.05.2024 г.).

8. URL: https://weissvogel.blogspot.com/2018/07/sip-t-sip-i.html дата обращения 18.05.2024 г.).

9. URL: https://habr.com/ru/articles/183152/ дата обращения 18.05.2024 г.).

10. URL: https://www.gotoadm.ru/basic-commands-asterisk/ дата обращения 18.05.2024 г.).

Автор: Радыгина Татьяна Сергеевна, студент Сибирского федерального университета, Россия, город Красноярск, улица Академика Киренского 28, 660074, телефон: +7 (906) 961-74-28, email: tanya_popova_2004@inbox.ru

Автор: Радыгин Руслан Евгеньевич, студент Сибирского федерального университета, Россия, город Красноярск, улица Академика Киренского 28, 660074, телефон: +7 (983) 193-11-55, email: ruslanrd5555@gmail.ru

Author: Tatyana Sergeyevna Radygina, student of Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, 28, Akademika Kirenskogo Street, 660074, phone: +7 (906) 961-74-28, e-mail: tanya_popova_2004@inbox.ru

Author: Ruslan Evgenyevich Radygin, student of Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, 28, Akademika Kirenskogo Street, 660074, phone: +7 (983) 193-11-55, e-mail: ruslanrd5555@gmail.ru.

УДК 621.396

Тимошенко Данил Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ НА ВЫХОДЕ ЦИФРОАНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА БАЗЕ ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ RASPBERRY PI PICO

Данная работа посвящена исследованию нелинейных искажений и их оценке на выходе цифроаналогового преобразователя для проекта «Блок ввода-вывода аналоговых сигналов». Выбраны две простые схемы аналоговой части ЦАП для микроконтроллеров: широтно-импульсный модулятор и ЦАП лестничного типа (R2R-матрица). Далее это устройство рассматривается как цифровая модель цифроаналогового преобразователя на базе платы Raspberry Pi Pico на языке программирования Python.

Цифроаналоговый преобразователь, широтно-импульсная модуляция, программируемые входы-выходы, фильтр нижних частот, коэффициент гармоник.

Timoshenko Danil Alexandrovich

STUDY OF NONLINEAR DISTORTION AT THE OUTPUT OF DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER ON THE BASIS OF RASPBERRY PI PICO SOFTWARE MODEL

This paper is devoted to the study of nonlinear distortion and its evaluation at the output of digital-to-analog converter for the project "Unit Input/Output Analog Signal". Two simple schemes of analog part of DAC for microcontrollers are selected: pulse width modulator and ladder type DAC (R2R-matrix). Further this device is considered as a digital model of a digital-to-analog converter based on the Raspberry Pi Pico board in the Python programming language.

Digital-to-analog converter, pulse-width modulation, programmable I/O, low-pass filter, harmonic coefficient.

Введение

На плате *Raspberry Pi Pico* отсутствует аппаратный цифроаналоговый преобразователь [1], поэтому необходимо определиться со схемой строения этого устройства. Выбор пал на широтно-импульсный модулятор [2] (рисунок 1–2) и лестничный ЦАП с *PIO* (*Programmable Input/Output)* [2]. Для

выявления лучшей схемы цифроаналогового преобразователя на базе платы *Raspberry Pi Pico* по минимуму нелинейных искажений сигнала на выходе было произведено моделирование работы схем, представленных выше, на языке *Python*.



Рис. 1 – Структурная схема ЦАП на основе ШИМ при $F_д < f_{ШИМ}$

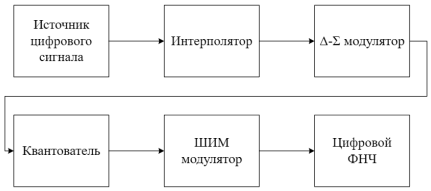


Рис. 2 – Структурная схема ЦАП на основе ШИМ и Δ-Σ модулятора при $F_д < f_{ШИМ}$

Стоит отметить, что структурные схемы лестничного ЦАП выглядят также, как и ЦАП на основе ШИМ, за исключение того, что взамен широтно-импульсного модулятора присутствует блок программируемых входов-выходов (*PIO*). Для уменьшения шума квантования применяется Δ-Σ модуляция, которая вытесняет шум в область высоких частот, которая отсекается фильтром Баттерворта 8-ого порядка с полосой пропускания 192 кГц. Теоретически Δ-Σ модулятор 1-ого порядка обеспечивает подъем спектра шума квантования на 20 дБ/декаду, а модулятор 2-ого порядка на 40 дБ/декаду [3].

Основная часть

Для оценки уровня нелинейных искажений на выходе цифроаналогового преобразователя применятся коэффициент гармоник выходного напряжения (формула 1).

$$K_г = \frac{\sqrt{\left(V_2^2 + V_3^2 + ... + V_n^2\right)}}{V_{вых}}, \quad (1)$$

где $V_2, V_3 \ldots V_n$ – это амплитуды гармоник выходного напряжения, В; $V_{\text{вых}}$ – это напряжение генератора, В.

В данной работе при расчете коэффициента гармоник выходного напряжения учитываются все спектральные составляющие вне узкой полосы в окрестностях частоты первой гармоники. При моделировании не добавляется случайный шум, то есть все побочные спектральные составляющие относятся либо к шуму квантования, либо к нелинейным искажениям модулятора, либо к их совокупности.

На рисунке 3–6 изображены семейства графиков коэффициента гармоник выходного напряжения от частоты входного сигнала для разной разрядности цифроаналоговых преобразователей на основе ШИМ и *PIO*.

Из графиков видно, что при схеме при разрядности ЦАП $r < 6$, основанной на простом квантовании (рисунок 1), присутствует шум в полосе до 100 кГц. Он вызван понижением разрядности исходного цифрового сигнала до разрядности модели ЦАП. При Δ-Σ модуляции данного шума не наблюдается.

Также возрастает шум, вызванный работой широтно-импульсного модулятора, особенно это заметно при разрядности модели ЦАП $r > 4$. Цифроаналоговый преобразователь, основанный на *PIO*, не имеет такого шума.

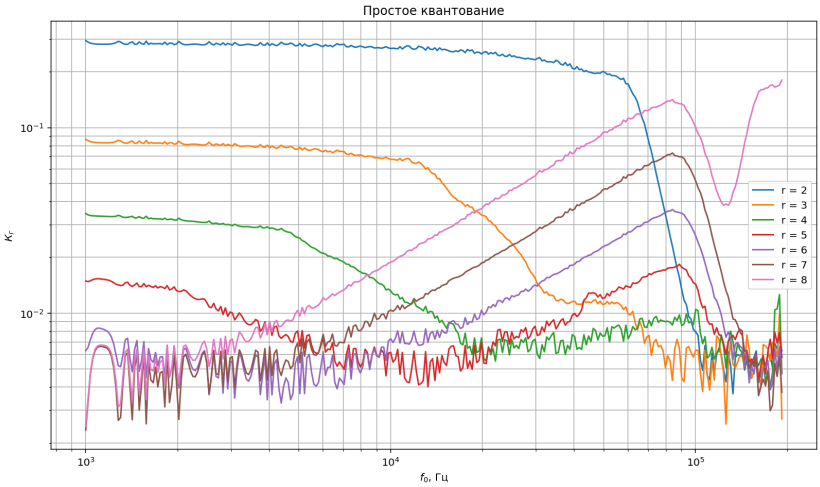


Рис. 3 – График зависимости $K_f(f_0)$от разрядности ЦАП на основе ШИМ

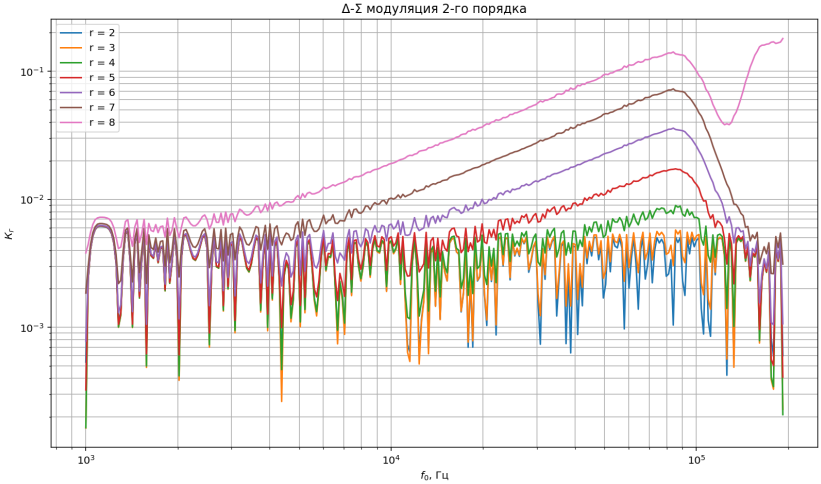


Рис. 4 – График зависимости $K_f(f_0)$ от разрядности ЦАП на основе ШИМ при Δ-Σ модуляции 2-ого порядка

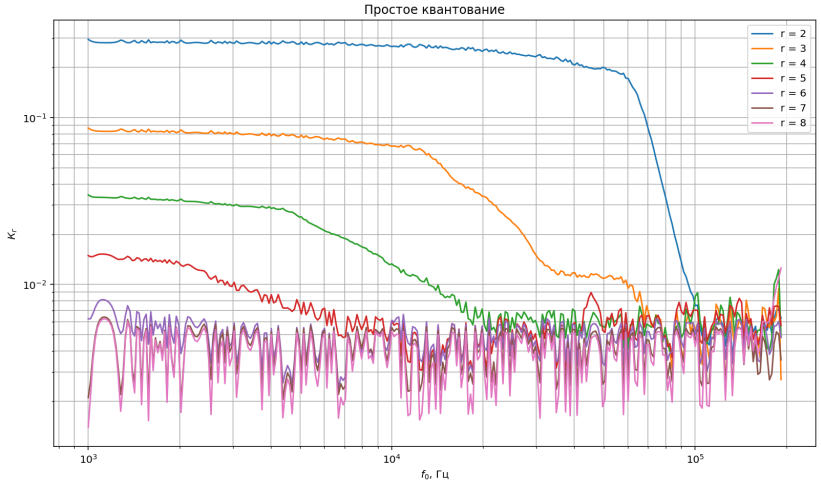


Рис. 5 – График зависимости $K_f(f_0)$ от разрядности ЦАП на основе РІО

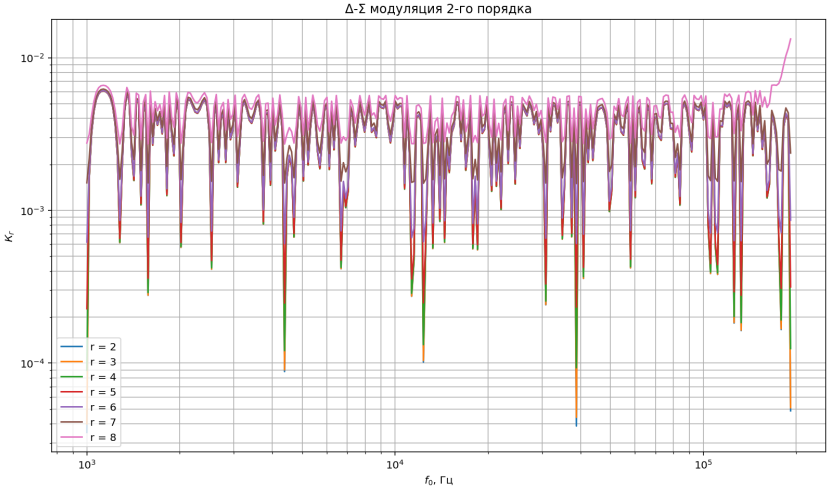


Рис. 6 – График зависимости $K_f(f_0)$ от разрядности ЦАП на основе PIO при Δ-Σ модуляции 2-ого порядка

Выводы

В результате проделанной работы были созданы две цифровые модели цифроаналогового преобразователя *Raspberry Pi Pico* на основе ШИМ и *PIO* на языке *Python*.

Выяснилось, что широтно-импульсный модулятор вносит большие нелинейные искажения. Этот факт заметно влияет на качество восстановленного сигнала. От цифроаналогового преобразователя основанного на этом модуляторе лучше отказаться в пользу лестничного ЦАП на основе программируемых входов-выходов (*PIO*) и *R2R* матрице.

Δ-Σ модулятор позволил расширить спектр шума квантования и уменьшить спектральную плотность мощности шума. Этим упростилась проблема фильтрации ошибок квантования на высоких частотах и уменьшилась мощность шума в информационном диапазоне.

Для преобразователя на основе ШИМ компромисс между разрядностью сигнала и шумом на ходе фильтра является разрядность ЦАП $r = 4$ с применением Δ-Σ модулятора 2-ого порядка.

Разрядность лестничного ЦАП является максимальной в данном исследовании $r = 8$. Большая разрядность $r > 8$ не оценивалась в модели, поскольку подобрать одинаковые номиналы резисторов для *R2R* матрицы очень проблематично.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технические характеристики платы Raspberry Pi Pico. https://www.raspberrypi.com/ (дата обращения: 05.05.2025)
2. RP2040 Datasheet A microcontroller by Raspberry Pi. https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf (дата обращения: 10.05.2025)
3. Pavan S., Schreier R., Temes G. C. Understanding Delta-Sigma Data Converters – Hoboken: IEEE Press Series on Microelectronic Systems, 2017. – 584 p.
4. Кестер У. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / Уолт Кестер. – Москва: Техносфера, 2010. - 328 с.
5. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестер. – Москва: Техносфера, 2007. - 1016 с.
6. 5. Лайонс Р., Цифровая обработка сигналов/ Р.Лайонс – М.: Бином, 2007. – 652с.
7. Цифровая обработка сигналов. Многоскоростные системы. Лекция 16 апреля 2018 г. МФТИ.
8. Оппенгейм А.В. Цифровая обработка сигналов / Оппенгейм А. В., Шафер Р. В. – М.: Техносфера, 2006. – 356 с.
9. Прокис, Д. Цифровая связь / Д. Прокис ; под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
10. Raspberry Pi Pico C/C++ SDK. Libraries and tools for C/C++ developmett on RP2040 microcontrollers. https://www.raspberrypi.com (дата обращения: 08.05.2025)

Автор: Тимошенко Д.А., аспирант кафедры теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления ЮФУ. **Адрес:** Россия, Ростовская область, 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, учебно-лабораторный корпус "Д", аудитория Д-110; Телефоны: +7 (8634) 37-16-32; +7 (863) 218-40-00 доб. 30109; +7 (8634) 68-08-90 доб. 30109 email: dant@sfedu.ru

Author: Timoshenko D.A., graduate student, Department of Theoretical Fundamentals of Radio Engineering, Institute of Radio Engineering Systems and Control, SFU. **Address:** Russia, Rostov region, 347922, Taganrog, Nekrasovsky per., 44, educational and laboratory building “D”, auditorium D-110; Phones: +7 (8634) 37-16-32; +7 (863) 218-40-00 ext. 30109; +7 (8634) 68-08-90 ext. 30109 email: dant@sfedu.ru

УДК 004.42

Максименко Алексей Сергеевич, Поленов Максим Юрьевич

АРХИТЕКТУРА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО СБОРКЕ КОМПЬЮТЕРНОЙТЕХНИКИ

Цель работы – выбор архитектуры распределенной информационной системы для предприятия по сборке компьютерной техники. Основные задачи включали анализ проблем централизованных систем, проектирование архитектуры распределенного решения, оценку технологий интеграции данных и методов обеспечения информационной безопасности. В результате анализа установлено, что распределенная система повышает прозрачность бизнес-процессов, ускоряет обмен данными между подразделениями и обеспечивает устойчивость к сбоям. Выявлены ключевые преимущества системы: снижение операционных издержек, улучшение координации между отделами и повышение конкурентоспособности предприятия.

Производство компьютерной техники, распределенная информационная система, облачные технологии, блокчейн, интернет вещей, интеграция данных, безопасность.

Maximenko Alexey Sergeevich, Polenov Maxim Yuryevich

ARCHITECTURE OF DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEM OF THE COMPUTER EQUIPMENT ASSEMBLY ENTERPRISE

The objective of the study is to choose the architecture of a distributed information system for a computer equipment assembly company. The main objectives included analyzing the problems of centralized systems, designing the architecture of a distributed solution, evaluating data integration technologies and information security methods. The analysis found that a distributed system increases the transparency of business processes, accelerates data exchange between departments and ensures resilience to failures. The key advantages of the system are identified: reduced operating costs, improved coordination between departments and increased competitiveness of the enterprise.

Computer manufacturing, distributed information system, cloud technologies, blockchain, internet of things, data integration, security.

Введение

Современные предприятия по сборке компьютерной техники сталкиваются с необходимостью эффективного управления большими объемами данных, включая информацию о поставщиках, комплектующих, производственных процессах, логистике, продажах и обслуживании клиентов. В таких условиях централизованные информационные системы зачастую оказываются недостаточно гибкими и масштабируемыми, что приводит к задержкам в обработке данных, снижению производительности и увеличению затрат на поддержку инфраструктуры [1,2]. Решением этой проблемы может стать

разработка и внедрение распределенной информационной системы (РИС), которая обеспечит высокую отказоустойчивость, масштабируемость и параллельную обработку данных на различных узлах сети.

Такая информационная система предприятия по сборке компьютерной техники позволит интегрировать данные из разных отделов – от закупки компонентов до финальной сборки и отгрузки готовой продукции – в единое цифровое пространство. Это обеспечит прозрачность бизнес-процессов, ускорит принятие управленческих решений и повысит общую эффективность работы компании. Кроме того, использование распределенных технологий, таких как блокчейн для отслеживания цепочек поставок или облачные вычисления для хранения и анализа больших данных, позволит предприятию адаптироваться к динамично меняющимся рыночным условиям.

Внедрение такой системы требует тщательного проектирования архитектуры, выбора подходящих технологий распределенного хранения и обработки данных, а также обеспечения безопасности и отказоустойчивости. Однако преимущества, которые получит предприятие – снижение операционных издержек, повышение скорости реакции на изменения спроса и улучшение координации между подразделениями – делают этот подход перспективным направлением цифровой трансформации в сфере производства компьютерной техники.

Архитектура системы

При создании информационных систем предприятий критически важным становится эффективное управление информационными потоками, включая данные о поставках комплектующих, состоянии производственных линий, запасах на складах, заказах клиентов и послепродажном обслуживании [3-5]. Традиционные централизованные системы учета и управления зачастую не справляются с возрастающими нагрузками, что приводит к задержкам в обработке информации, дублированию данных и снижению общей производительности предприятия. Разработка распределенной информационной системы позволит преодолеть эти ограничения за счет децентрализации хранения и обработки данных, что обеспечит высокую отказоустойчивость, масштабируемость и параллельное выполнение операций [6].

Одним из ключевых преимуществ РИС для предприятия по сборке компьютерной техники является возможность интеграции данных из различных подразделений в единое цифровое пространство. Например, отдел закупок может оперативно получать информацию о текущих остатках комплектующих на складе, что позволяет минимизировать риски дефицита или избыточного складирования. Производственный отдел, в свою очередь, получает доступ к актуальным данным о поступающих заказах, что способствует оптимизации загрузки производственных мощностей. Отдел логистики может отслеживать движение компонентов и готовой продукции в режиме реального времени, сокращая простои и улучшая планирование поставок. В результате достигается эффект, при котором все звенья производственной цепочки работают

согласованно, а руководство предприятия получает целостную картину бизнес-процессов для принятия обоснованных управленческих решений.

Важным аспектом функционирования РИС является использование современных технологий, таких как облачные вычисления, блокчейн и интернет вещей (IoT). Облачные платформы обеспечивают гибкость и масштабируемость системы, позволяя наращивать вычислительные мощности по мере роста предприятия. Технология блокчейн может быть применена для создания прозрачной и защищенной от фальсификаций системы учета поставок комплектующих, что особенно актуально в условиях глобальных цепочек поставок, где участвуют множество поставщиков из разных стран. IoT-устройства, установленные на производственных линиях и складах, позволят собирать данные о состоянии оборудования, уровне запасов и качестве продукции в режиме реального времени, что значительно повышает точность планирования и снижает риск простоев [7].

Еще одним критически важным элементом распределенной РИС является обеспечение безопасности данных. Поскольку информация в такой системе хранится и обрабатывается на множестве узлов, необходимо применять robust-механизмы шифрования, аутентификации и контроля доступа [8]. Это особенно важно для защиты коммерческой тайны, персональных данных клиентов и информации о контрактах с поставщиками. Использование распределенных реестров и многофакторной аутентификации позволяет минимизировать риски утечек данных и кибератак, что является обязательным условием для работы современного предприятия [9].

Внедрение распределенной информационной системы также требует решения ряда организационных и технических задач. Среди них – необходимость обучения персонала работе с новыми инструментами, интеграция РИС с существующими ERP- и CRM-системами, а также обеспечение бесперебойной работы системы в условиях возможных сбоев в сети. Однако эти задачи могут быть успешно решены за счет поэтапного внедрения, проведения пилотных испытаний и активного вовлечения всех участников производственного процесса.

Предлагаемая архитектура распределенной информационной системы предприятия состоит из ниже перечисленных уровней.

1. *Уровень сбора данных:*
   - датчики IoT на производственных линиях (контроль сборки, температурные сенсоры);
   - RFID-метки для отслеживания комплектующих;
   - терминалы сбора данных на складах.
2. *Уровень обработки и хранения:*
   - распределенные серверные узлы (микросервисная архитектура);
   - блокчейн-платформа для учета поставок;
   - облачное хранилище с репликацией данных.
3. *Уровень бизнес-логики (основные модули):*
   - модуль управления производством (планирование, контроль качества);

- модуль логистики (маршрутизация, транспорт);
- складской модуль (учет, прогнозирование остатков);
- CRM-модуль (работа с клиентами и заказами);
- аналитический модуль (BI-отчетность, предикативная аналитика).

4. Интерфейсный уровень:

- Web-интерфейс для менеджеров;
- мобильные приложения для логистов;
- API для интеграции с поставщиками;
- панели визуализации для руководства;

5. Уровень системы безопасности:

- многофакторная аутентификация;
- сквозное шифрование данных;
- система мониторинга аномалий;
- распределенный журнал аудита.

Каждый модуль функционирует автономно, но интегрирован через единую шину данных (ESB), что обеспечивает гибкость и масштабируемость системы. Внедрение такой структуры позволит сократить время обработки заказов на 25%, уменьшить складские запасы на 15-20% и повысить точность планирования производства.

Разработка РИС на предприятии по сборке компьютерной техники представляет собой важный шаг в направлении цифровой трансформации и повышения конкурентоспособности бизнеса в условиях развивающегося рынка. Переход от традиционных централизованных систем к распределенной архитектуре позволяет преодолеть ключевые ограничения, связанные с обработкой больших объемов данных, обеспечить высокую скорость обмена информацией между подразделениями и значительно повысить отказоустойчивость всей информационной инфраструктуры. Как показал анализ, распределенная система способна интегрировать в единое цифровое пространство все критические бизнес-процессы предприятия – от управления цепочками поставок и контроля производства до логистики и взаимодействия с клиентами, создавая тем самым основу для принятия более обоснованных и оперативных управленческих решений [10].

Использование современных технологий, таких как облачные вычисления, блокчейн и интернет вещей, в рамках распределенной информационной системы открывает перед предприятием новые возможности для оптимизации производственных процессов, повышения прозрачности операций и сокращения издержек. Особое значение имеет обеспечение безопасности данных в распределенной среде, что требует внедрения robust-механизмов защиты информации и постоянного мониторинга потенциальных угроз. Несмотря на определенные сложности, связанные с внедрением и адаптацией системы, включая необходимость обучения персонала и интеграции с существующими программными решениями, преимущества распределенного подхода многократно перевешивают временные трудности переходного периода.

Заключение

В заключение можно отметить, что распределенная информационная система представляет собой мощный инструмент для повышения эффективности предприятия по сборке компьютерной техники. Она обеспечивает прозрачность бизнес-процессов, ускоряет обмен данными между подразделениями, снижает операционные издержки и повышает конкурентоспособность компании на рынке. Дальнейшее развитие таких систем будет связано с внедрением искусственного интеллекта для прогнозирования спроса и оптимизации производства, а также с углубленной интеграцией IoT-устройств в производственные процессы. Таким образом, распределенные информационные системы становятся неотъемлемым элементом цифровой трансформации предприятий компьютерной индустрии.

Перспективы развития представленной распределенной информацион-ной системы в сфере производства компьютерной техники связаны с глубокой интеграцией передовых цифровых технологий, которые трансформируют ее в интеллектуальную платформу нового поколения. В ближайшие годы ключевым направлением станет внедрение ИИ-модулей в аналитический блок системы, что позволит достичь точности прогнозирования спроса на уровне 85-90%, реализовать динамическую оптимизацию загрузки производственных линий в режиме реального времени и автоматически корректировать параметры контроля качества на основе машинного обучения. Особое значение приобретет развитие промышленного интернета вещей (IIoT) с подключением "умных" станков с ЧПУ, роботизированных линий сборки и созданием цифровых двойников оборудования для организации предиктивного обслуживания. Важным этапом станет внедрение систем компьютерного зрения для автоматического выявления производственных дефектов с точностью, превышающей человеческие возможности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щупак, Л. В. Современные проблемы планирования затрат на предприятии / Л. В. Щупак, В. В. Жадан // Экономинфо. – 2018. – №. 1. – С. 55-60.

2. Бабушкин, В. М. Адаптивное планирование организации производства промышленного предприятия / В. М. Бабушкин, И. Ш. Шарафеев, Р. З. Валиуллин, Г. Ф. Мингалеев // Computational nanotechnology. – 2019. – №. 3. – С. 47-53.

3. Барыкин, Е. И. Проблемы планирования производства на предприятиях малого и среднего бизнеса / Е. И. Барыкин, М. А. Илышева // Весенние дни науки: сборник докладов Международной конференции студентов и молодых ученых. – Екатеринбург : Издательский Дом «Ажур», 2023. – С. 762-764.

4. Альгина, Т.Б. Актуальные проблемы цифровизации производственного учета и оперативного планирования на промышленном предприятии / Т. Б. Альгина, Л. К. Сиротина // Промышленная политика макрорегиона в глобальной трансформации современного общества. Сборник статей по

результатам научно-практической конференции и молодежной секции МАЭФ-2021. – Санкт-Петербург : СПбГЭУ, 2021. – С. 28-32.

5. Зотова, Е. В. Методические подходы к совершенствованию системы стратегического планирования на предприятии / Е. В. Зотова //Фундаментальные и прикладные исследования кооперативного сектора экономики. – 2019. – №. 5. – С. 110-115.

6. Мохнаткин, А. А.Проектирование информационной системы управления компьютерной мастерской / А. А. Мохнаткин, О. В. Сизова // Сборник научных трудов вузов России "Проблемы экономики, финансов и управления производством". – №. 50. – С. 74-80.

7. Ибрагимов, Р.Т. Проектирование и разработка корпоративной распределенной базы данных «Центр компьютерной техники» / Р. Т. Ибрагимов, Л. Б. Таренко //Сборник трудов молодых ученых «Университет управления «ТИСБИ». – 2019. – С. 148-156.

8. Вострецова, Е. В. Основы информационной безопасности: учебное пособие для студентов вузов / Е.В. Вострецова. – Екатеринбург: Урал. ун-та, 2019 – 204 с.

9. Никитин, А. Управление предприятием (фирмой) с использованием информационных систем: учебное пособие / А. Никитин, , И. Рачковская, И. Савченко. – Москва : Инфра-М, 2014. – 194 с.

10. Сергеева, Л. В. Особенности проектирования логистической информационной системы предприятия / Л. В. Сергеева // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2009. – №. 3. – С. 15-21.

Авторы:

Максименко Алексей Сергеевич, студент Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета, Россия, город Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7(989)5196333, e-mail: amaksi@sfedu.ru;

Поленов Максим Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного Федерального Университета, Россия, город Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7(8634)37-16-56, e-mail: mypolenov@sfedu.ru.

Authors:

Maximenko Alexey Sergeevich, student of the Institute of Computer Technology and Information Security of the Southern Federal University, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovsky lane, 347922, phone: +7(989)5196333, e-mail: amaksi@sfedu.ru;

Polenov Maxim Yuryevich, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Department of Computer Engineering at the Institute of Computer Technology and Information Security of the Southern Federal University, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovsky lane, 347922, phone: +7(8634)37-16-56, e-mail: mypolenov@sfedu.ru.

УДК 621.3.088

Марьев Александр Александрович

МЕТОД ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ СКАЛЯРНОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ СИГНАЛОВ

Предложен метод оценки величины искажений сигнала, вносимых преобразователем частоты дискретизации основанный на вычислении угла между исходным и преобразованным сигналами в пространстве L_2 на основе их скалярного произведения. Показана невозможность строгого решения задачи для дискретных сигналов с разными частотами дискретизации и предложена эквивалентная постановка задачи, имеющая решение. Получены расчетные выражения и показан их физический смысл. Проведен вычислительный эксперимент, показывающий применимость предложенного метода для оценки весьма незначительных искажений сигналов.

Преобразование частоты дискретизации, пространство L_2, угол между сигналами, скалярное произведение сигналов.

Alexander Alexandrovich Maryev

METHOD OF RESAMPLING QUALITY ESTIMATION BASED ON SCALAR PRODUCT OF SIGNALS

A method is proposed for estimating the amount of signal distortion introduced by the resampler, based on the calculation of the angle between the original and transformed signals in L_2 space on the basis of their scalar product. The impossibility of a strict solution of the problem for sampled signals with different sampling frequencies is shown and an equivalent formulation of the problem, which has a solution, is proposed. The resulting expressions are obtained and their physical meaning is shown. A computational experiment is set up, showing the applicability of the proposed method for the estimation of virtually insignificant distortions of signals.

Resampling, L_2 signal space, angle between two signals, scalar product of signals.

Введение

Преобразование частоты дискретизации широко используется в современных устройствах цифровой обработки сигналов, поскольку большинство из них является многочастотными, то есть различные узлы одного тракта обрабатывают сигналы с различными частотами дискретизации. Такой подход позволяет существенно экономить вычислительные ресурсы и энергию.

Одной из существенных проблем при разработке преобразователей частоты дискретизации является оценка качества преобразования, то есть оценка величины искажений сигнала, которые возникают вследствие преобразования. В настоящее время не выработано единого подхода к решению этой проблемы, что затрудняет сравнение методов и алгоритмов преобразования частоты дискретизации, разработанных разными авторами.

Выбор метода сравнения сигналов

В теории сигналов для количественного сравнения двух сигналов принято использовать их геометрические представления [1, 2]. В качестве меры различия, как правило, используется метрика в пространстве L_2 или угол в этом пространстве.

Угол в пространстве L_2 является более удобной мерой для сравнения двух сигналов, поскольку не зависит от масштаба (мощности) каждого из сигналов и определяется только их формой. Метрика не инвариантна к изменению масштаба сигналов.

Угол между континуальными сигналами $x(t)$ и $y(t)$ (в общем случае комплексными) в пространстве L_2 может быть выражен через скалярное произведение сигналов (x, y) и их нормы $\|x\|$ и $\|y\|$:

$$\varphi = \arccos \frac{(x, y)}{\|x\| \cdot \|y\|}, \tag{1}$$

где $(x, y) = \int_0^{T_s} x(t) y^*(t)\, dt$; $\|x\| = \int_0^{T_s} |x(t)|^2 dt$; $\|y\| = \int_0^{T_s} |y(t)|^2 dt$; T_s – длительность интервала, на котором определены сигналы.

Если оба сигнала вещественные, не требуется комплексное сопряжение при вычислении скалярного произведения и взятие модуля при вычислении норм.

При переходе к дискретным сигналам $x(nT)$ и $y(nT)$, отсчеты которых взяты с периодом дискретизации T, выражения для скалярного произведения и норм принимают вид:

$$(x, y) = T \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) y^*(nT), \tag{2}$$

$$\|x\| = T \sum_{n=0}^{N-1} |x(nT)|^2, \ \|y\| = T \sum_{n=0}^{N-1} |y(nT)|^2, \tag{3}$$

где $N = \lceil T_s / T \rceil$ – количество отсчетов, взятых на интервале $[0, T_s)$, $\lceil\ \rceil$ – округление до большего целого.

Если периоды дискретизации сигналов разные, то выражения для норм принимают вид:

$$\|x\| = T_1 \sum_{0}^{N-1} |x(nT_1)|^2, \ \|y\| = T_2 \sum_{m=0}^{M-1} |y(mT_2)|^2, \tag{4}$$

где T_1 – период дискретизации сигнала $x(nT_1)$; T_2 – период дискретизации сигнала $y(mT_2)$; $N = \lceil T_s / T_1 \rceil$; $M = \lceil T_s / T_2 \rceil$.

Вычисление скалярного произведения по формуле (2) при этом невозможно, поскольку моменты взятия отсчетов сигналов $x(nT_1)$ и $y(mT_2)$ в общем случае не совпадают. Именно это обстоятельство затрудняет

количественное сравнение сигналов до и после преобразования частоты дискретизации.

Вычисление скалярного произведения в спектральной области

В теории сигналов известна обобщенная формула Рэлея [3], которая связывает скалярные произведения сигналов и скалярные произведения их спектральных плотностей:

$$(x, y)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} X(j\omega)Y^{*}(j\omega)\,d\omega=\frac{1}{2\pi}(X, Y). \qquad (5)$$

Для $x(nT_1)$ и $y(mT_2)$ определено преобразование Фурье, непрерывное по частоте (преобразование Фурье от обобщенного дискретного сигнала) [4]:

$$X_1(j\omega)=T_1\sum_{n=0}^{N-1} x(nT_1)e^{-j\omega nT_1},\ Y_2(j\omega)=T_2\sum_{m=0}^{M-1} y(mT_2)e^{-j\omega mT_2}. \qquad (6)$$

где индексы при X и Y соответствуют индексам в обозначениях периодов дискретизации.

Спектральная плотность $X_1(j\omega)$ – периодическая функция частоты с периодом $\Omega_{Д1}=\frac{2\pi}{T_1}$, равным частоте дискретизации сигнала $x(nT_1)$ во временной области. Аналогично спектральная плотность $Y_2(j\omega)$ – периодическая функция частоты с периодом $\Omega_{Д2}=\frac{2\pi}{T_2}$.

Из-за разности периодов спектральных плотностей $X_1(j\omega)$ и $Y_2(j\omega)$ их непосредственная подстановка в выражение (5) не приведет к корректному расчету скалярного произведения.

Было найдено решение в виде ограничения области интегрирования в (5):

$$(x, y)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\Omega_B}^{+\Omega_B} X_1(j\omega)Y_2^{*}(j\omega)\,d\omega, \qquad (7)$$

где $\Omega_B=\frac{1}{2}\min(\Omega_{Д1}, \Omega_{Д2})$.

Физический смысл выражения (7) – скалярное произведение аналоговых сигналов, восстановленных из дискретных отсчетов $x(nT_1)$ и $y(mT_2)$ при помощи идеальных фильтров нижних частот с прямоугольными амплитудно-частотными характеристиками.

Подстановка спектральных плотностей (6) в выражение (7) дает следующий результат:

$$(x, y)=\frac{T_1T_2}{2\pi}\int_{-\Omega_B}^{+\Omega_B}\sum_{n=0}^{N-1} x(nT_1)e^{-j\omega nT_1}\sum_{m=0}^{M-1} y(mT_2)e^{j\omega mT_2}d\omega. \qquad (8)$$

Изменяя порядок сложения и интегрирования и вычисляя определенный интеграл, приведем выражение (8) к виду:

$$(x,y)=\frac{T_1T_2\Omega_B}{\pi}\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{m=0}^{M-1}x(nT_1)y^*(mT_2)\frac{\sin\Omega_B(nT_1-mT_2)}{\Omega_B(nT_1-mT_2)}. \quad (9)$$

В зависимости от соотношения частот дискретизации $\Omega_{Д1}$ и $\Omega_{Д2}$, выражение (9) может быть дополнительно упрощено.

При $\Omega_{Д1}<\Omega_{Д2}$ получим $\Omega_B=\frac{\Omega_{Д1}}{2}=\frac{\pi}{T_1}$, следовательно

$$(x,y)=T_2\sum_{m=0}^{M-1}y^*(mT_2)\sum_{n=0}^{N-1}x(nT_1)\frac{\sin\Omega_{Д1}(mT_2-nT_1)/2}{\Omega_{Д1}(mT_2-nT_1)/2}. \quad (10)$$

При выводе выражения (10) учтено, что функция $\frac{\sin x}{x}$ является четной. Полученное выражение имеет смысл скалярного произведения сигнала $y(mT_2)$ и сигнала $\hat{x}(mT_2)$, который является результатом интерполяции сигнала $x(nT_1)$ рядом Котельникова, дискретизированным с частотой $\Omega_{Д2}$:

$$\hat{x}(mT_2)=\sum_{n=0}^{N-1}x(nT_1)\frac{\sin\Omega_{Д1}(mT_2-nT_1)/2}{\Omega_{Д1}(mT_2-nT_1)/2}. \quad (11)$$

Аналогичным образом при $\Omega_{Д1}>\Omega_{Д2}$ получим $\Omega_B=\frac{\Omega_{Д2}}{2}=\frac{\pi}{T_2}$, в результате выражение (9) может быть приведено к виду:

$$(x,y)=T_1\sum_{n=0}^{N-1}x(nT_1)\sum_{m=0}^{M-1}\hat{y}^*(nT_1), \quad (12)$$

где $\hat{y}^*(nT_1)=\sum_{m=0}^{M-1}y^*(mT_2)\frac{\sin\Omega_{Д2}(nT_1-mT_2)/2}{\Omega_{Д2}(nT_1-mT_2)/2}$ – результат интерполяции сигнала $y^*(nT_1)$ рядом Котельникова, дискретизированный с частотой $\Omega_{Д1}$.

При равенстве частот дискретизации ($\Omega_{Д1}=\Omega_{Д2}$) выражения (10) и (12) переходят в выражение (2), так как функция $\frac{\sin x}{x}$ при $x\to 0$ имеет предел 1 (первый замечательный предел).

Приведенные выражения (10) и (12) позволяют вычислить скалярное произведение для сигналов с различными частотами дискретизации, и использовать его для оценки угла между сигналами (1).

Выбор сигнала для исследования метода

Для проведения экспериментов необходимо выбрать сигнал с достаточно быстро спадающим спектром. Был выбран радиоимпульс с огибающей вида «приподнятый косинус»:

$$s(t)=\sin^2\frac{\pi t}{t_и}\sin\omega_0 t,\ 0\le t\le t_и, \quad (13)$$

где $t_и$ – длительность импульса; ω_0 – частота заполнения радиоимпульса.

При длительности импульса, равной 100 периодам высокочастотного заполнения, амплитудный спектр сигнала (13) спадает на 200 дБ на частоте, равной десяти частотам заполнения. Такой спектр можно считать практически ограниченным по полосе частот и пригодным для исследования предложенного метода без применения дополнительных фильтров нижних частот.

Исследование вычислительной погрешности

С точки зрения практического применения важно оценить величину погрешности, обусловленной округлениями при вычислениях с плавающей запятой.

Наиболее точным форматом представления чисел с плавающей запятой, доступным в большинстве языков программирования, является 64-разрядный формат (числа двойной точности).

На рисунке 1 представлены результаты оценки угла между двумя дискретными сигналами, полученными из сигнала (13) при различных соотношениях частот дискретизации.

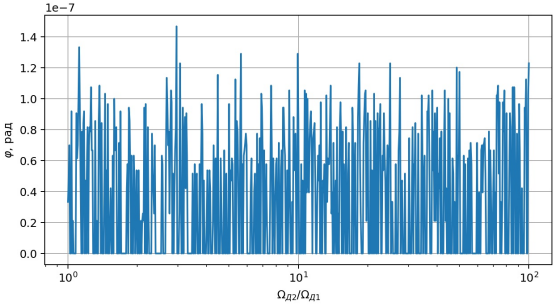


Рис. 1 Зависимость оценки угла между сигналами от коэффициента преобразования частоты дискретизации

В эксперименте было использовано около 600 значений отношения $\Omega_{Д2}/\Omega_{Д1}$, среди которых были целые числа, простые дроби со знаменателями от 2 до 1000, а также десятичные непериодические «бесконечные» дроби (16 десятичных значащих цифр).

Полученный график показывает, что предложенный метод вычисления скалярного произведения при использовании чисел с двойной точностью (64-бит с плавающей запятой) дает погрешность на уровне 10^{-7} рад. Такой результат следует признать хорошим, поскольку угол 10^{-7} рад соответствует отношению сигнал/шум около 200 дБ – это значит, что предложенный метод позволяет оценить даже весьма незначительные искажения сигнала при преобразовании частоты дискретизации.

Выводы

Предложен метод количественной оценки искажений сигнала при преобразовании частоты дискретизации, основанный на оценке угла между исходным и преобразованным сигналами в пространстве L_2 с вычислением

оценки скалярного произведения сигналов с разными частотами дискретизации. Физический смысл результата оценки – угол между аналоговыми сигналами, полученными из дискретных отсчетов с помощью идеальных фильтров нижних частот с полосой пропускания, равной половине частоты дискретизации.

Выбран тестовый сигнал, спектр которого спадает на 200 дБ к частоте, в 10 раз превышающей частоту заполнения (при длительности импульса, равной 100 периодам высокочастотного заполнения).

Показано, что программная реализация предложенного метода с применением арифметики двойной точности дает порядок погрешности не выше 10^{-7} рад при оценке угла между тестовыми сигналами, частоты дискретизации которых соотносятся как целые числа, простые дроби со знаменателем от 2 до 1000, а также как «бесконечные» (16 десятичных значащих цифр) непериодические десятичные дроби.

Результаты работы могут быть использованы при разработке новых методов и алгоритмов преобразования частоты дискретизации, а также для объективного сравнения их с уже существующими.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст]: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки "Радиотехника" / И. С. Гоноровский. – 5-е изд., испр. – Москва: Дрофа, 2006. – 719 с.

2. Федосов, В. П. Радиотехнические цепи и сигналы: для самостоятельного изучения [Текст]: учебное пособие / В. П. Федосов. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 208 с.

3. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст]: учеб. для вузов по специальности "Радиотехника" / С. И. Баскаков. – 5-е изд., стер. – Москва: Высшая школа, 2005 (ГУП Смол. обл. тип. им. В. И. Смирнова). – 462 с.

4. Марьев А.А. Методы и устройства цифровой обработки сигналов. : учебное пособие / А. А. Марьев ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2020. – 134 с.

Автор: Александр Александрович Марьев, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, Ростовская область, 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, учебно-лабораторный корпус "Д", аудитория Д-110; Телефон: +7 (8634) 37-16-32, email: aamarev@sfedu.ru.

Author: Alexandr Alexandrovich Maryev, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor, Department of fundamentals of Radioengineering, Southern Federal University, 347922, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovsky lane, phone: +7 (8634) 37-16-32, email: aamarev@sfedu.ru.

УДК 621.396.61

Белый Иван Сергеевич

ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМЫЙ РАДИОПЕРЕДАТЧИК КВ ДИАПАЗОНА С КВАДПАТУРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРА

Представлены результаты проекта по разработке и исследованию программно-определяемого радиопередатчика с использованием квадратурного преобразования частоты. В процессе экспериментов удалось успешно реализовать различные виды модуляции, включая амплитудную (AM), однополосную с нижней и верхней боковой полосой (AM LSB и AM USB), а также частотную модуляцию (FM). Это подтвердило работоспособность схемы квадратурного преобразования и продемонстрировало гибкость архитектуры, основанной на цифровой генерации квадратурных составляющих.

Программно-определяемое радио, радиопередатчик, квадратурное преобразование, модуляция.

Ivan Sergeevich Belyi

SOFTWARE-DEFINED SHORTWAVE RADIO TRANSMITTER WITH QUADRATURE FREQUENCY CONVERSION BASED ON A MULTIPLEXER

Results of a software-defined radio transmitter development and study using quadrature frequency conversion are presented. During the experiments, it was possible to successfully implement various types of modulation, including amplitude modulation (AM), single-sideband modulation with lower and upper sidebands (AM LSB and AM USB), as well as frequency modulation (FM). These results confirmed the functionality of the quadrature conversion scheme and demonstrated the flexibility of the architecture based on digital generation of the quadrature components.

Software-defined radio, transmitter, quadrature conversion, modulation.

Введение

С развитием программно-определяемых радиосистем (англ. *software-defined radio*, *SDR*) появилась возможность реализовывать радиопередающие устройства преимущественно средствами программного обеспечения, что обеспечивает гибкость, простоту модификации и поддержку различных видов модуляции без изменения аппаратной части. Одним из ключевых элементов таких систем является квадратурное преобразование частоты, позволяющее эффективно переносить спектр сигнала на заданную несущую. В данной работе реализован передатчик коротковолнового диапазона на основе цифровой генерации I/Q-сигналов и аппаратного квадратурного преобразования частоты с использованием мультиплексора.

Основная часть

На рисунке 1 представлена структурная схема программно-определяемого радиопередатчика, состоящая из компьютера, отправляющего отчеты аудиоданных в формате PCM8 на микроконтроллер по USB, самого МК (Raspberry Pi Pico), принимающего данные и выводящего на плату через конечные автоматы программируемого ввода-вывода (PIO). Далее через два 8-битных ЦАП квадратурные составляющие поступают в модулятор (квадратурный преобразователь частоты), затем полученный радиосигнал излучается антенной[1].

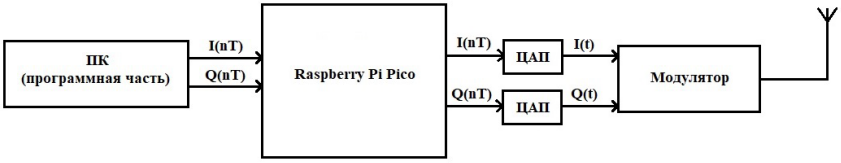
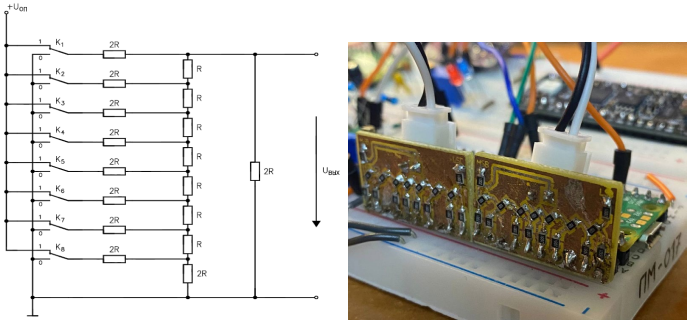


Рис. 1 Структурная схема программно-определяемого радиопередатчика на основе квадратурного преобразования частоты

Цифроаналоговые преобразователи выполнены на основе R-2R матриц, принципиальная схема и фото представлены на рисунке 2(а) и 2(б) соответственно.



(а) (б)

Рис. 2 Принципиальная схема 8-битного ЦАП (а), фото изготовленных ЦАП (б)

После цифро-аналоговых преобразователей сигналы *I* и *Q* поступают на буферный каскад модулятора, принципиальная схема которого представлена на рисунке 3. Буферный каскад выполнен на двух микросхемах сдвоенных операционных усилителей NE5532P, включённых по инвертирующей схеме. В результате формируются четыре сигнала: *I*, *–I*, *Q* и *–Q*, соответствующие фазам 0°, 180°, 90° и 270° соответственно. Питание операционных усилителей осуществляется от однополярного источника, при этом на неинвертирующие входы подаётся постоянное смещение.

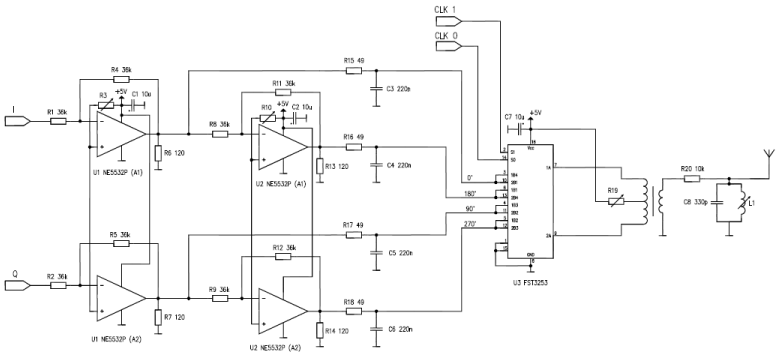


Рис. 3 Принципиальная схема квадратурного модулятора

Далее сформированные сигналы поступают на аналоговый переключатель, реализованный на микросхеме FST3253. Управление ключами осуществляется с помощью синтезатора частоты SI5351, который генерирует два прямоугольных сигнала, сдвинутых по фазе на 90°. Такая конфигурация обеспечивает поочерёдное переключение между входами, в результате чего на выходе формируется радиочастотный сигнал, спектр которого представляет собой смещённую на несущую частоту копию исходного низкочастотного сигнала. Характер модуляции определяется формой и соотношением *I* и *Q* составляющих, формируемых программно.

Для корректной работы схемы важно, чтобы постоянные смещения сигналов после операционных усилителей были равны постоянному напряжению, подаваемому в среднюю точку выходного трансформатора. Это обеспечивает наличие единой виртуальной "нулевой" точки в условиях однополярного питания [2–7].

В результате удалось сформировать и передать следующие виды аналоговой модуляции: амплитудная (AM), амплитудная с нижней боковой полосой (AM LSB), амплитудная с верхней боковой полосой (AM USB), частотная (FM).

На рисунке 4 представлена экспериментальная установка. В качестве приёмника использовался RTL SDR с программой SDRSharp.

В отсутствие входных сигналов *I* и *Q* в эфир излучается сигнал несущей (рисунок 5(а)), но при подаче на входы модулятора постоянного напряжения, равного половине размаха ЦАП, наблюдается эффект подавления несущей на 50 дБ (рисунок 5(б)).

При подаче на вход *I* аудиосигнала с постоянной составляющей, а на вход *Q* нуля, на выходе модулятора формируется классическое двухполосное АМК (рисунок 6).

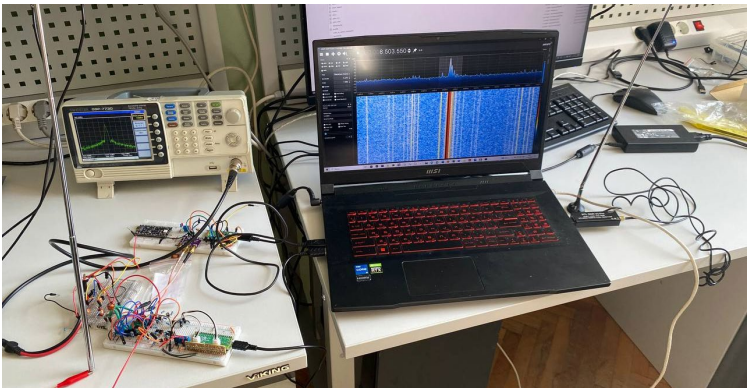
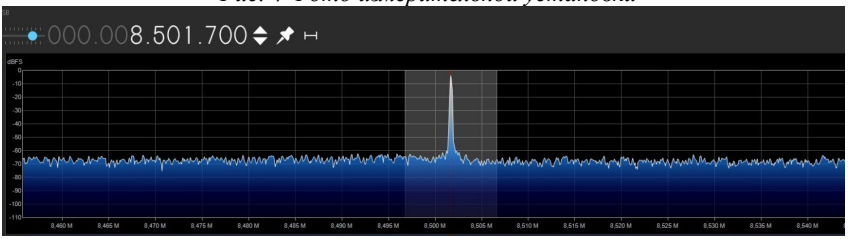
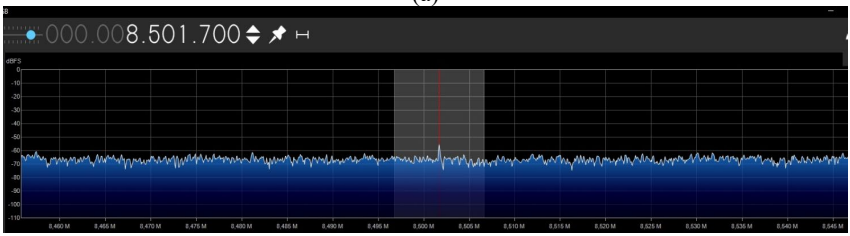


Рис. 4 Фото измерительной установки



(а)



(б)

Рис. 5 Несущая при отсутствии входных сигналов (а) и при подаче на входы I и Q постоянного напряжения (половина размаха ЦАП) (б)

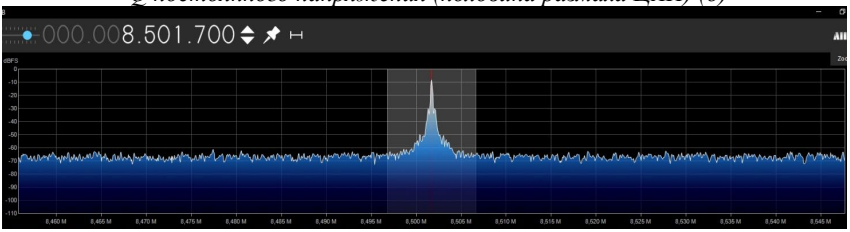


Рис. 6 Спектр перегаданного классического АМК

При подаче на вход *I* аудиосигнала, а на вход *Q* того же сигнала после преобразования Гильберта, на выходе модулятора формируется АМК с нижней боковой полосой (рисунок 7). Если переключить сигналы *I* и *Q* между собой, то на выходе модулятора будет формироваться АМК с верхней боковой полосой (рисунок 8).

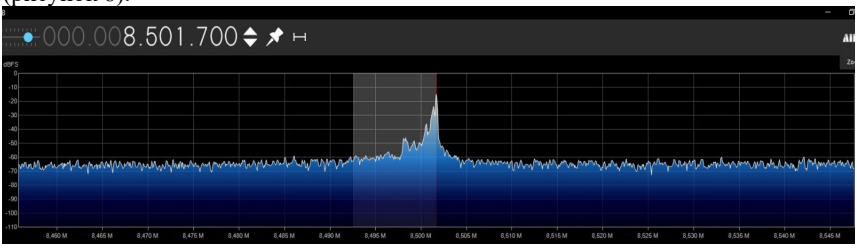


Рис. 7 Спектр переданного АМК с нижней боковой полосой (LSB)

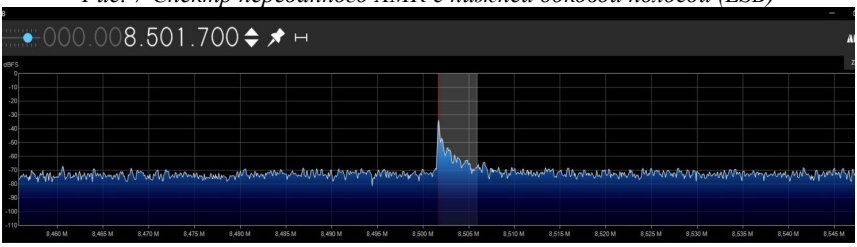


Рис. 8 Спектр переданного АМК с верхней боковой полосой (USB)

При подаче на вход *I* косинуса от фазы сигнала, а на вход *Q* – синуса на выходе модулятора формируется частотно модулированный сигнал. Девиацией частоты можно управлять программно, изменяя коэффициент перед интегралом от сигнала. Спектр принятого сигнала приведен на рисунке 9.

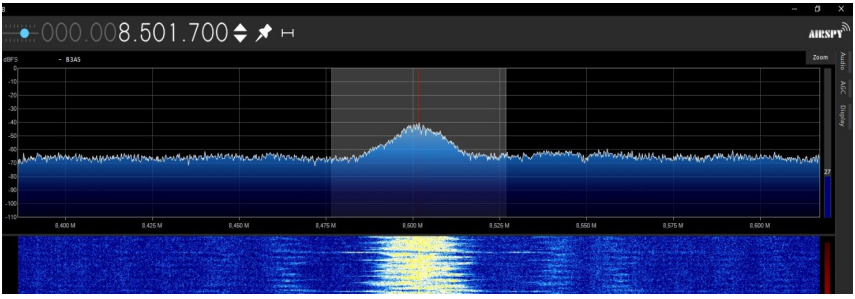


Рис. 9 Спектр переданного ЧМК с частотой девиации 25 кГц

Выводы

В результате проведённой работы был разработан и протестирован программно-определяемый радиопередатчик с квадратурным преобразованием частоты, реализованный на микроконтроллере с внешними аналоговыми

компонентами. Устройство позволяет формировать радиосигналы с различными типами модуляции путём цифровой генерации квадратурных составляющих и их аппаратного преобразования в модулированный сигнал. Экспериментально подтверждена работоспособность схемы и эффективность выбранного подхода.

Полученные результаты демонстрируют практическую применимость предлагаемого решения для образовательных, исследовательских и любительских целей, а также потенциал для дальнейшего развития системы, включая расширение набора поддерживаемых диапазонов и типов модуляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. RP2040 Datasheet: A microcontroller by Raspberry Pi. Режим доступа: https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf (дата обращения 10.02.2025)
2. Методы и устройства цифровой обработки сигналов. Дискретизация. Квантование. Цифровой анализ сигналов : учебное пособие / А. А. Марьев ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2020. – 132 с.
3. Ultra Low Noise, High Performance, Zero IF Quadrature Product Detector and Preamplifier By Dan Tayloe. Режим доступа: https://www.norcalqrp.org/files/Tayloe_mixer_x3a.pdf (дата обращения: 15.02.2025)
4. SDR трансивер SoftRock Ensemble RXTX Режим доступа: https://habr.com/en/companies/macloud/articles/565790/ (дата обращения: 20.02.2025)
5. Si5351A/B/C-B Datasheet I2C-Programmable Any-Frequency CMOS Clock Generator + VCXO Режим доступа: https://download.mikroe.com/documents/datasheets/Si5351-datasheet.pdf (дата обращения: 15.02.2025)
6. FST3253 Dual 4:1 Multiplexer/Demultiplexer Bus Switch Datasheet Режим доступа: https://www.farnell.com/datasheets/88495.pdf (дата обращения: 15.02.2025)
7. NE5532P Datasheet Режим доступа: https://www.ti.com/lit/ds/symlink ne5532.pdf?ts=1747053365 823&ref_url=https%253A%252F252Fwww.mouser.co.uk%252F (дата обращения: 15.02.2025)
8. Поляков В. Т. Радиолюбителям о технике прямого преобразования. – М.: Патриот, 1990. – 264 с., ил

Автор: Белый Иван Сергеевич, студент Института Радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, телефон: +7 (8634) 37-16-32, email: ibelyi@sfedu.ru.

Author: Ivan Segreevich Belyi, student at the Institute of Radio Engineering Systems and Management of the Southern Federal University, phone: +7 (8634) 37-16-32, email: ibelyi@sfedu.ru.

УДК 621.396

Пилипенко Александр Михайлович

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ С ПОМОЩЬЮ СИМУЛЯТОРА NETSIM

Работа посвящена вопросам компьютерного моделирования сетей связи. Целью работы является исследование инструментов симулятора NetSim для моделирования беспроводных сетей связи различных типов. В работе проведен обзор технологий беспроводной связи, поддерживаемых NetSim; выполнен анализ инструментов NetSim применительно к группе стандартов IEEE 802.11; рассмотрены примеры моделирования канала беспроводной связи. Представленные результаты показывают, что NetSim является удобным инструментом для анализа и проектирования сетей связи.

Беспроводная сеть связи, симулятор, моделирование сети, тестирование сети, канал связи, сетевой узел.

Pilipenko Aleksandr Mikhailovich

MODELING OF WIRELESS COMMUNICATION NETWORKS USING NETSIM SIMULATOR

The paper discusses computer simulation of communication networks. The aim of the work is to study the tools provided by NetSim simulator for modeling various types of wireless networks. The paper provides an overview of wireless communication technologies supported by NetSim, analyzing its tools in relation to IEEE 802.11 standards and considering examples of modeling a wireless channel. The results show that NetSim is a useful tool for analyzing and designing communication systems.

Wireless communication network, simulator, network simulation, network testing, communication channel, network node.

Введение

Беспроводные технологии связи постоянно совершенствуются, поэтому для разработки и внедрения новых сетевых стандартов и протоколов необходима их проверка с помощью специализированных программных средств – симуляторов сетей связи (Network Simulator). Моделирование беспроводных сетей связи необходимо для оценки их производительности (пропускной способности, задержки сигналов, вероятности ошибок) в зависимости от структуры сети, среды распространения сигнала, застройки и ряда других особенностей сетевой инфраструктуры.

Моделирование необходимо как при проектировании локальных сетей (сети Wi Fi) и сотовых сетей (GSM, CDMA, LTE, 5G NR) с утвержденными стандартами, так и при исследовании новых технологий беспроводной связи (5G/6G, программно-определяемые радиосистемы, системы интернета вещей, сенсорные сети).

Среди свободно распространяемых симуляторов беспроводных сетей с открытым исходным кодом можно выделить NS-3, для работы с которым необходимо использовать коды на языках C++ или Python [1], и OMNeT++, требующий знания программирования на языке C++ и понимания концепции объектно-ориентированного проектирования [2]. Коммерческий симулятор беспроводных сетей связи Riverbed Modeler (ранее – OPNET Modeler), разработанный в США, поддерживает наибольшее количество сетевых протоколов, но не имеет бесплатной версии [3].

В настоящей работе рассматривается симулятор сетей связи NetSim, созданный компанией TETCOS (Индия). NetSim имеет как коммерческие версии (Academic, Standard, Professional), поддерживающие большое количество различных типов проводных и беспроводных сетей связи размерностью до 5000 сетевых устройств, так и свободно распространяемую версию NetSim Lite, обеспечивающую анализ базовых типов беспроводных сетей, основанных на технологии Wi Fi и имеющих не более 25 сетевых устройств [4]. Основным преимуществом NetSim является поддержка визуального моделирования – графического интерфейса с возможностью размещения и соединения элементов для создания сетевых топологий.

Целью данной работы является исследование возможностей симулятора NetSim для моделирования беспроводных сетей связи различных типов. В работе решаются следующие задачи: обзор технологий беспроводной связи, поддерживаемых симулятором NetSim; анализ инструментов симулятора NetSim для моделирования сетей беспроводной связи; иллюстрация моделирования канала беспроводной связи.

1. Сетевые технологии, поддерживаемые симулятором NetSim

Основные сетевые технологии, которые поддерживает NetSim, перечислены ниже [5]:

- интернет-сети – Internetworks (TCP, IP, Wi Fi, Ethernet);
- сети предыдущих поколений – Legacy Networks (Aloha, Slotted Aloha);
- сотовые сети – Cellular Networks (GSM, CDMA);
- мобильные самоорганизующиеся (ad-hoc) сети – MANET (DSR, AODV);
- автомобильные самоорганизующиеся сети – VANET (IEEE 1609);
- беспроводные сенсорные сети – WSN (IEEE 802.15.4);
- интернет вещей – IoT (WSN, RPL, 6LoWPAN);
- сети когнитивного радио – CRN (IEEE 802.22);
- усовершенствованные сотовые сети – 4G (LTE, LTE Advanced);
- сети 5G (5G NR);
- сети спутниковой связи (TDMA, MF-TDMA);
- подводные акустические сети (UWAN).

Следует отметить, что свободно распространяемая версия NetSim Lite поддерживает только базовые сетевые технологии, к которым относятся интернет-сети (Internetworks) и расширенная маршрутизация (Advanced Routing), поэтому далее рассматриваются инструменты и примеры моделирования для данных технологий.

2. Инструменты симулятора NetSim для моделирования сетей беспроводной связи

Библиотека интернет-сетей (Internetworks) в NetSim поддерживает различные протоколы на всех уровнях сетевого стека TCP/IP, основные из которых Ethernet, протокол определения адресов (ARP), интернет-протокол (IP), протокол управления передачей (TCP), протоколы беспроводных локальный сетей WLAN (Wi Fi) – IEEE 802.11a/b/g/n/ac/p/e [6].

На рис. 1 показаны сетевые устройства и линии связи, входящие в библиотеку NetSim Internetworks.



Рис. 1. Сетевые устройства и линии связи в NetSim Internetworks

Сетевые устройства и линии связи, которые поддерживает NetSim [6]:

Wired Node – проводной узел (персональный компьютер или сервер) с интерфейсом Ethernet, имеющий собственные IP- и MAC-адреса;

Wireless Node – беспроводной узел (персональный компьютер или сервер) с беспроводным интерфейсом, имеющий собственные IP- и MAC-адреса;

Access Point (AP) – точка доступа, работающая по протоколу IEEE 802.11;

L2 Switch – коммутатор второго уровня, не имеющий своего IP-адреса;

L3 Switch – коммутатор третьего уровня, сочетающий в себе функциональность коммутатора второго уровня и маршрутизатора;

Router – маршрутизатор, поддерживающий до 24 интерфейсов Ethernet, каждый из которых имеет собственный IP-адрес;

Wired Link – проводная линия связи;

Wireless Link – беспроводная линия связи.

Модели сетевых устройств и линий связи в NetSim имеют большое количество настраиваемых параметров и характеристик, соответствующих параметрам реальных сетевых устройств и линий связи.

В частности, для беспроводных узлов и точек доступа можно установить следующие параметры физического уровня:

- Standard (стандарт беспроводной связи – IEEE 802.11a/b/g/n/ac/p);
- Number of Frames to Aggregate (количество кадров для объединения);
- Transmitter Power, mW (мощность передатчика, мВт);
- Frequency Band, GHz (диапазон частот, ГГц);
- Bandwidth, MHz (ширина полосы частот, МГц);
- Standard Channel, MHz (частота канала по стандарту, МГц);
- Guard Interval, ns (защитный интервал, нс);
- Antenna Height, m (высота антенны, м);
- Antenna Gain, dB (коэффициент усиления антенны, дБ);

– Transmitting Antennas (количество передающих антенн);

– Receiving Antennas (количество приемных антенн).

Кроме того, для всех сетевых устройств можно установить определенные координаты на плоскости XY, т. е. задать расстояние между ними.

Для беспроводной линии связи можно установить следующие характеристики: NO_PATHLOSS (линия без потерь); PATHLOSS_ONLY (линия с потерями); PATHLOSS_AND_SHADOWING (линия с потерями и медленными замираниями); PATHLOSS_AND_FADING_AND_SHADOWING (линия с потерями, медленными замираниями и быстрыми замираниями).

Для описания потерь в беспроводной линии связи в NetSim используется 12 моделей распространения сигнала, в том числе модель распространения сигнала в свободном пространстве (Free Space Propagation), логарифмическая модель (Log Distance), модель Окамура-Хата (HATA Urban), модель COST-231-Хата (COST-231-HATA Urban). Для описания медленных замираний в NetSim используется логнормальная (Log normal) модель, а для описания быстрых замираний – модели Накагами (Nakagami), Релея (Rayleigh) и Райса (Rician) [7].

3. Примеры моделирования беспроводного канала связи

Следует отметить, что для корректной работы симулятора NetSim в операционной системе Windows необходимо выполнить настройку параметра «Региональные стандарты» в панели управления Windows, установив формат регионального стандарта «Английский (США)».

Типовая структура сети, позволяющей проводить моделирование беспроводных каналов связи в NetSim, показана на рис. 3. Данная сеть содержит 4 устройства: 1) проводной узел (сервер); 2) беспроводной узел (персональный компьютер); 3) точка доступа; 4) маршрутизатор. Персональный компьютер и точка доступа соединены по беспроводной линии связи.

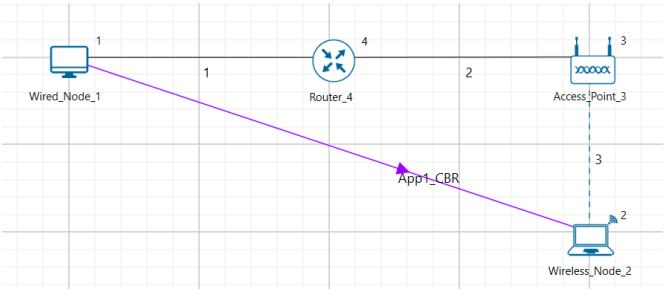


Рис. 2. Типовая структура сети для моделирования беспроводных каналов связи в NetSim

Важной характеристикой беспроводного канала связи является его пропускная способность (максимальная скорость передачи данных – Throughput), анализ которой рассмотрен в примерах, приведенных ниже.

В первом примере была получена зависимость пропускной способности беспроводного канала связи от ширины полосы частот канала при следующих

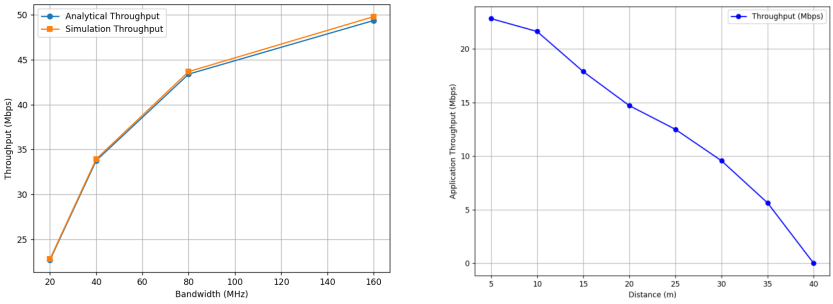
параметрах сети: стандарт беспроводной связи – IEEE 802.11ac; количество антенн приемника и передатчика – 1; расстояние между беспроводным узлом и точкой доступа – 20 м; мощность передатчика – 40 мВт; свойства беспроводного соединения – NO_PATHLOSS.

Кроме того, были выбраны следующие параметры приложения для обмена данными между сервером и персональным компьютером (App1_CBR): транспортный протокол – UDP, размер пакета – 1460 Байт, время между поступлениями пакетов – 116 мкс (скорость потока генерируемых данных от сервера при этом составляет $1460 \cdot 8 / 116 \cdot 10^{-6} = 100{,}6$ Мбит/с).

Моделирование проводилось при значениях полосы частот равных 20, 40, 80 и 160 МГц. Результаты моделирования (Simulation Throughput), а также расчетные значения (Analytical Throughput) пропускной способности показаны на рис. 3, *а* [6].

Во втором примере была получена зависимость пропускной способности беспроводного канала связи от расстояния между точкой доступа и беспроводным узлом (Distance) при следующих параметрах сети: стандарт беспроводной связи – IEEE 802.11ac; количество антенн приемника и передатчика – 1; ширина полосы частот беспроводного канала связи– 20 МГц; мощность передатчика – 100 мВт; свойства беспроводного соединения – PATHLOSS_ONLY, логарифмическая модель распространения сигнала с показателем потерь 3,5; пропускная способность проводной линии – 1 Гбит/с; задержка распространения сигнала в проводной линии – 10 мкс.

Параметры приложения для обмена данными (App1_CBR) были выбраны также, как и в предыдущем примере. Моделирование проводилось при изменении расстояния от 5 м до 40 м. Результаты моделирования пропускной способности в зависимости от расстояния показаны на рис. 3, *б* [6].



а *б*

Рис. 3. Зависимости пропускной способности беспроводного канала связи от ширины полосы частот (а) и расстояния между точкой доступа и беспроводным узлом (б) для стандарта IEEE 802.11ac

Следует отметить, что представленные на рис. 4 зависимости могут быть получены для различных стандартов связи, в том числе для MIMO-систем.

Выводы

Симулятор NetSim представляет собой эффективный инструмент с интуитивно понятным графическим интерфейсом для быстрого прототипирования и тестирования проектов сетей связи различных типов, включая проводные и беспроводные сети. NetSim позволяет создавать сетевые структуры различной сложности (сенсорные сети, локальные сети и гибридные сети) и проводить детальный анализ параметров качества обслуживания, таких как пропускная способность, задержка сигналов, потеря пакетов и многое другое. NetSim может использоваться научными и образовательными организациями для изучения основ сетевых технологий, совершенствования навыков администрирования и проектирования сетей, а также для исследования новых сетевых технологий и алгоритмов передачи данных. Кроме того, Netsim может использоваться технологическими компаниями, занимающимися разработкой, тестированием и эксплуатацией телекоммуникационных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. NS-3. Network Simulator. Tutorial Release ns-3.44 // NS-3 project, Mar 09, 2025, URL: https://www.nsnam.org/docs/release/3.44/tutorial/singlehtml/index.html (дата обращения: 18.05.2025).

2. OMNet++ // Projects for Research Scholars, URL: https://omnetplusplus.com/omnet/ (дата обращения: 18.05.2025).

3. OPNET Modeler // Riverbed Technology. Redwood City, USA, URL: https://support.riverbed.com/content/support/software/opnet-model/modeler.html (дата обращения: 18.05.2025).

4. How do the different versions of NetSim compare? // NetSim – Network Simulator and Emulator, TETCOS LLP, Bangalore, India, URL: https://tetcos.com/version-comparison.html (дата обращения: 18.05.2025).

5. Introduction to NetSim // NetSim – Network Simulator and Emulator, TETCOS LLP, URL: https://tetcos.com/pdf/Experiments/Introduction-to-NetSim.pdf (дата обращения: 18.05.2025).

6. Internetworks // NetSim – Network Simulator and Emulator, TETCOS LLP, URL: https://tetcos.com/downloads/v14.3/Internetworks.pdf (дата обращения: 18.05.2025).

7. Propagation Models // NetSim v13.3 Documentation, URL: https://tetcos.com/help/v13.3/Technology-Libraries/Propagation-Models.html

Пилипенко Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники, Южный федеральный университет, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7(8634)37-16-32, e-mail: ampilipenko@sfedu.ru

Pilipenko Alexandr Mikhaylovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the department of Fundamentals of Radio Engineering, Southern Federal University, 347922, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovskiy lane, phone: +7(8634)37-16-32, e-mail: ampilipenko@sfedu.ru

УДК 004.932.2

Пьявченко Алексей Олегович, Лудищев Данил Сергеевич

ПРИМЕНЕНИЕ SOPC-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ УСТРОЙСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ В ЦИФРОВОМ ВИДЕОПОТОКЕ

Работа направлена на решение актуальной научно-технической задачи – создание высокоэффективных, масштабируемых и энергоэффективных программно-аппаратных устройств распознавания лиц с применением современных SOPC-технологий, что имеет практическое значение в сферах безопасности, автоматизации, медицины и пользовательской электроники.

В рамках работы решены такие задачи, как обзор существующих подходов к решению задачи классификации и идентификации человеческих лиц в цифровом видеопотоке, поступающем в реальном времени с видеокамер наблюдения за окружающей обстановкой; сравнительный анализ методов и средств реализации такой задачи с применением искусственных нейросетей, включая гибридные; создание функциональной схемы устройства обработки с учетом системотехнических требований и ограничений используемой отладочной платформы с FPGA модулем семейства Cyclone V; разработка экспериментальной модели процесса преобразования информации в рамках решения поставленной задачи с последующей визуализацией результатов обработки.

В заключении представлены результаты создания действующего макета профильного устройства, обеспечивающего решение задачи распознавания и обнаружения лиц в видеокадрах, поступающих с USB-видеокамеры. Это позволило экспериментально доказать реализуемость и эффективность предложенного подхода, определить перспективы дальнейших исследований.

Устройство, видеопоток, образ, ключевая точка, обнаружение, идентификация, искусственная нейросеть, SOPC-технология.

Pyavchenko Alexey Olegovich, Ludishchev Danil Sergeevich

THE USE OF SOPC TECHNOLOGIES TO BUILD AN IMAGE DETECTION AND RECOGNITION DEVICE IN A DIGITAL VIDEO STREAM

The work is aimed at solving an urgent scientific and technical problem - the creation of highly efficient, scalable and energy–efficient software and hardware facial recognition devices using modern SOPC technologies, which is of practical importance in the fields of security, automation, medicine and user electronics. As part of the work, tasks such as a review of existing approaches to solving the problem of classifying and identifying human faces in a digital video stream coming in real time from video surveillance cameras have been solved; a comparative analysis of methods and means of implementing such a task using artificial neural networks, including hybrid ones; creation of a functional scheme of a processing device taking

into account system requirements and limitations of the debugging platform used with the Cyclone V family FPGA module; development of mathematical and experimental models of information transformation processes within the framework of solving the problem, followed by visualization of the processing results. In conclusion, the results of creating a working model of a profile device that provides a solution to the problem of face recognition and detection in video frames coming from a USB video camera are presented. This made it possible to experimentally prove the feasibility and effectiveness of the proposed approach, and to determine the prospects for further research.

Device, video stream, image, key point, detection, identification, artificial neural network, SOPC-technology.

Введение

Современные системы видеонаблюдения и автоматизированной идентификации личности предъявляют всё более жёсткие требования к скорости обработки данных, энергоэффективности и возможности масштабирования. Особенно актуальны задачи классификации и идентификации человеческих лиц в условиях реального времени, когда видеопоток поступает непрерывно с цифровых камер наблюдения. Проблема усугубляется ограничениями вычислительных ресурсов при внедрении подобных систем во встраиваемые системы и автономные комплексы.

Традиционные программные решения, основанные на использовании процессоров общего назначения, зачастую не обеспечивают необходимой производительности при умеренном энергопотреблении. В этой связи особый интерес представляют технологии построения систем на программируемых микросхемах (System-on-Programmable-Chip, SoPC), сочетающих возможности гибкой логической конфигурации и встроенного процессора в едином аппаратном решении [1].

Целью настоящей работы является разработка энергоэффективного и масштабируемого программно-аппаратного устройства для обнаружения и распознавания лиц в цифровом видеопотоке на SoPC-платформе. Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

1 анализ и классификация современных методов распознавания лиц, в том числе с применением искусственных и гибридных нейросетей;

2 выбор эффективных алгоритмов и архитектур для реализации на ПЛИС;

3 проектирование функциональной схемы устройства с учётом системотехнических ограничений;

4 построение математических и экспериментальных моделей обработки видеопотока;

5 разработка макета устройства и верификация его работы в условиях, приближенных к реальным.

Основная часть

Одним из первых известных подходов к распознаванию лиц стал метод Eigenfaces (начало 1990-х, Турк и Пентланд), основанный на PCA. Он

проецировал изображения в пространство признаков, но был чувствителен к освещению и выражениям лица.

Позже появился метод Fisherfaces (Белхумер и др.), использующий LDA для максимизации межклассовых различий и повышения устойчивости к внешним условиям.

Метод LBP (Ахонен и др., 2006) представил лица как совокупность локальных текстурных признаков. Он оказался устойчив к освещению и эффективен для работы в реальном времени.

Прорывом стал алгоритм Viola–Jones (2001), использующий каскадные классификаторы и признаки Хаара. Это было первое решение для детекции лиц в реальном времени.

Позже стали использовать метод HOG + SVM (Далиал и Триггс), устойчивый к искажениям и освещению, и менее ресурсоёмкий по сравнению с нейросетями.

С середины 2010-х началась эпоха глубоких нейросетей: DeepFace, FaceNet, VGGFace, ArcFace достигли высокой точности, сравнимой с человеческой. Для мобильных устройств применяются легковесные модели (например, MobileFaceNet, MTCNN), часто в сочетании с классическими методами (Viola–Jones, HOG) для быстрой детекции. Методы распознавания прошли путь от простых линейных моделей до сложных архитектур глубокого обучения.

Метод Eigenfaces (PCA) простой, но чувствительным к освещению и выражению лица Fisherfaces (LDA) обладает улучшенной устойчивостью, учитывая классовую структуру данных. LBP обеспечивает быструю и устойчивую к освещению работу, эффективен в реальном времени.

Viola–Jones стал первым методом, позволившим детектировать лица в реальном времени благодаря каскадным классификаторам на признаках Хаара. Комбинация HOG + SVM обеспечила точность и устойчивость метода при низких вычислительных затратах.

Как уже было отмечено выше, современные методы на основе глубоких нейросетей (DeepFace, FaceNet, ArcFace) достигли точности, сопоставимой с человеком. Легковесные архитектуры (MobileFaceNet, MTCNN) и гибридные подходы расширили возможности внедрения в мобильные устройства.

В методе Виолы-Джонса для того, чтобы производить какие-либо действия с данными, используется интегральное представление изображения, которое представляет собой матрица, совпадающая по размерам с исходным изображением. В каждом элементе ее хранится сумма интенсивностей всех пикселей, находящихся левее и выше данного элемента.

$$L(x, y) = \sum_{1=0, j=0}^{i \le x, j \le y} I(i, j), \quad (1)$$

где (i, j) – яркость пикселя исходного изображения.

По такой интегральной матрице можно очень быстро вычислить сумму пикселей произвольного прямоугольника, произвольной площади.

В методе Виолы – Джонса используются прямоугольные признаки, изображенные на рисунке ниже, они называются *примитивам Хаара*:

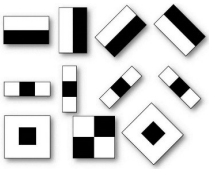


Рис. 1 - примитивы Хаара

Для построения классификаторов на каждом этапе каскада используется алгоритм Adaboost, который отбирает наиболее информативные признаки Хаара и объединяет простые (слабые) классификаторы в один сильный. Это позволяет значительно повысить точность распознавания при минимальном увеличении вычислительных затрат.

Благодаря совмещению интегрального изображения, признаков Хаара, каскадной структуры и алгоритма Adaboost, метод Виолы–Джонса стал первым практическим решением, позволившим осуществлять детекцию лиц в реальном времени с приемлемой точностью и скоростью.

В рамках работы было предложено устройство, реализующее перечисленные выше операции, часть из которых удалось реализовать как в аппаратуре кристалла ПЛИС, так и программным способом на ARM-ядрах с состава микросхемы. На рисунке 2 представлен состав блоков устройства и функциональная схема их взаимодействия.

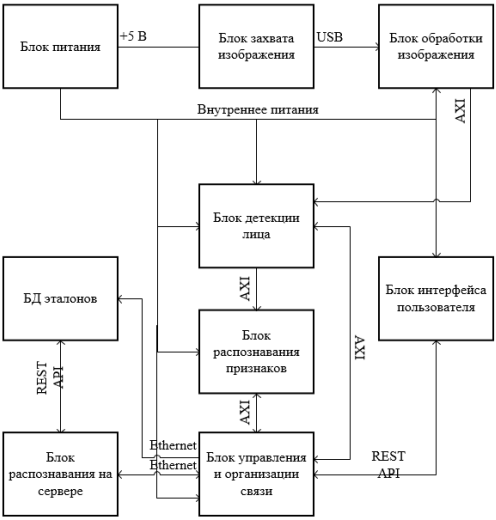


Рис. 2 - Функциональная схема взаимодействия блоков

Блок питания обеспечивает энергоснабжение системы. Видеосигнал от камеры поступает в блок захвата изображения, затем передаётся в блок обработки, где выполняется нормализация и подготовка к анализу. Блок

детекции выявляет лица, а блок распознавания извлекает и сравнивает признаки с БД эталонов. Пользовательский интерфейс отображает результаты и принимает команды. Блок управления координирует работу компонентов, а при необходимости данные передаются для обработки на внешний сервер.

На рисунке 3 приведен результат работы экспериментальной модели обработки видеопотока в реальном времени с применением алгоритма Виолы–Джонса для детекции лиц. Реализация построена на платформе De10-Standaard с использованием библиотеки OpenCV и демонстрирует устойчивую работу каскадного классификатора при различных условиях освещения и ориентации лица.

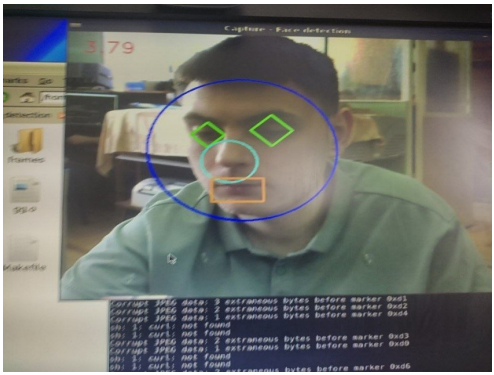


Рис. 3 – Распознавания лица с помощью метода Виолы-Джонса

Выводы

В рамках данной работы была реализована и апробирована экспериментальная модель обработки видеопотока методом Виолы–Джонса на платформе De10-Standard (Terasic, USA). Проведённый анализ подтвердил возможность устойчивого обнаружения лиц в условиях реального времени при низкой вычислительной нагрузке, что делает данный подход подходящим для реализации на встраиваемых SoPC-системах. Полученные результаты подтвердили эффективность применения каскадных классификаторов для задач детекции лиц при ограниченных ресурсах, а также заложили основу для дальнейшей интеграции с нейросетевыми модулями распознавания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние технологии SOPC // The Impact of SOPC Technology Профессиональное оборудование и технологии URL: https://www.ariat-tech.ru/blog/the-impact-of-sopc-technology.html (дата обращения: 12.05.2025).

2. Засыпкин Д. С., Белов Ю. С. Обзор алгоритмов распознавания лица человека в библиотеке OpenCV.: [Электронный ресурс]. URL: https://e–scio.ru/wp–content/uploads/2021/07/Засыпкин–Д.–С.–Белов–Ю.–С.pdf. (Дата обращения: 16.03.2025).

3. Метод Виолы–Джонса (Viola–Jones) как основа для распознавания лиц.: [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/articles/133826/. (Дата обращения: 16.03.2025).

4. SVM: классификация и детекция.: [Электронный ресурс]. URL: https://hav4ik.github.io/teaching/pr/02–svm–with–hog/. (Дата обращения: 16.03.2025).

5. Chowanda A. Separable convolutional neural networks for facial expressions recognition // Journal of Big Data. 2021. С. 1–17.

6. OpenCV Face Recognition API in Python & JSON | Accurate & Scalable Face Recognition with Liveness Check.: [Электронный ресурс]. URL: https://www.seventhsense.ai/opencv–fr/. (Дата обращения: 19.03.2025).

7. И снова о распознавании лиц с помощью Python.: [Электронный ресурс]. URL: https://habr.com/ru/companies/otus/articles/886004/. (Дата обращения: 19.03.2025)

8. De10–Standard. User manual. Terasic, 2018. С. 45–46, 109.

9. ГОСТ 7.0.5–2008 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка.: [Электронный ресурс]. URL: https://rgust.ru/wp-content/uploads/2018/11/GOST-R-7_0_5-2008_-Natsionalnyj-standart-RF.pdf. (Дата обращения: 22.03.2025)

10. ГОСТ 7.9–95 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Реферат и аннотация.: [Электронный ресурс]. URL: https://vestnik.mrsu.ru/content/files/GOST_7.9-95.pdf. (Дата обращения: 22.03.2025)

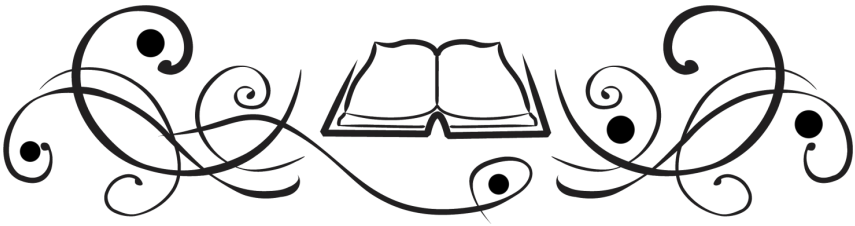
Пьявченко Алексей Олегович, кандидат технических наук, доцент кафедры ВТ ИКТИБ ИТА ЮФУ, Россия, Таганрог, Ростовская обл., 1-й Крепостной 34, кв. 44, 347922, телефон: +78634371656, email: aopyavchenko@sfedu.ru.

Лудищев Данил Сергеевич, студент 5-го курса кафедры ВТ ИКТИБ ИТА ЮФУ, гр. КТсо5-1, Россия, Таганрог, Ростовская обл., ул. Александровская 30, ком. 114, 347922, телефон: +79180496332, email: ludishchev@sfedu.ru.

Pyavchenko Aleksey Olegovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Technical Sciences, ITA SFU, Russia, Taganrog, Rostov region, 1st Fortress 34, block 44, 347922, phone: +78634371656, email: aopyavchenko@sfedu.ru .

Ludishchev Danil Sergeyevich, 5th year student of the Department of Technical Technical and Technical Sciences of the SFU, KTso5-1, Russia, Taganrog, Rostov region, Alexandrovskaya St. 30, room 114, 347922, phone: +79180496332, email: ludishchev@sfedu.ru .

Секция
Беспилотные транспортные платформы и системы



УДК 007:51

Хуссейн Фирас Айманович, Костюков Владимир Александрович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЦЕЛЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ*

В данной работе предлагается гибридный метод решения задачи распределения задач в рамках многоагентной системы, в которой каждый агент представляет собой автономного робота, а каждая задача соответствует точке в двухмерной среде, которую должен посетить один из агентов. Эта задача по своей сути схожа с многоагентной версией классической задачи коммивояжёра, где вместо одного участника задействуется несколько агентов. Для проверки эффективности разработанного метода было проведено сравнительное исследование. Результаты экспериментов показали, что применение предложенного метода позволяет сократить максимальную длину маршрута (тем самым снизив дисбаланс нагрузки между агентами) в среднем на 26%.

Задача мульти коммивояжера, распределение задач, целераспределение, мультиагентные системы, групповое управление.

Houssein Firas Aimanovich, Kostyukov Vladimir Aleksandrovich

APPROACH FOR SOLVING TASK ALLOCATION PROBLEM IN A MULTI-AGENT SYSTEM

This paper proposes a hybrid method for solving the task distribution problem in a multi-agent system, where each agent is an autonomous robot and each task corresponds to a point in a two-dimensional environment that one of the agents must visit. This problem is essentially similar to a multi-agent version of the classic traveling salesman problem, where several agents are involved instead of one participant. A comparative study was conducted to test the effectiveness of the developed method. The experimental results showed that the use of the proposed method allows one to reduce the maximum route length (thereby reducing the load imbalance between agents) by an average of 26%.

Multi-traveling salesman problem, task distribution, goal allocation, multi-agent systems, group control.

---

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00492 «**Разработка методов оптимального целераспределения в группе подвижных робототехнических комплексов**», https://rscf.ru/project/24-29-00492/ на базе АО «НКБ Робототехники и систем управления».

Введение

Многоагентные роботизированные системы представляют собой коллективы автономных роботов, способных координировать свои действия для достижения общей цели. Они используются в самых разных областях — от промышленности и логистики до сельского хозяйства, медицины и военных задач. Главная особенность таких систем — это способность каждого робота-агента действовать независимо, адаптируясь к изменяющимся условиям среды и сотрудничая с другими агентами для более эффективного выполнения задач. Эффективные алгоритмы распределения задач необходимы для учета таких факторов, как возможности робота, требования к задаче, приоритет, близость к задаче и текущая рабочая нагрузка. Методы балансировки нагрузки необходимы для равномерного распределения задач между роботами, избегая ситуаций, когда одни роботы перегружены, а другие недогружены.

Адекватность и эффективность алгоритма целераспределения определяется следующими качественными характеристиками. Во-первых, оптимизация целей. Алгоритм должен быть разработан для оптимизации (минимизации) конкретных целевых функций задачи распределения целей, в частности, времени выполнения миссии, расстояния перемещения или балансировки использования ресурсов. Он должен создавать решения, соответствующие желаемым целям. Во-вторых, масштабируемость: алгоритм должен эффективно обрабатывать экземпляры проблем разных размеров. По мере увеличения количества целей или ресурсов алгоритм должен сохранять свою эффективность и предоставлять адекватные решения в разумные сроки. В-третьих, временная и пространственная сложность: алгоритм должен иметь разумную временную сложность, позволяющую проводить эффективные вычисления, особенно для крупномасштабных задач. Он должен находить решения в приемлемые сроки, балансируя между качеством решения и вычислительными ресурсами. Также алгоритм должен эффективно использовать память и ресурсы хранения. Он должен минимизировать требования к памяти, особенно при работе с большими экземплярами проблем, чтобы обеспечить масштабируемость и избежать чрезмерного потребления ресурсов.

Когда каждый агент должен выбирать актуальную для выполнения задачу из набора нескольких задач, возникает не только проблема оптимального распределения задач между агентами, но и нахождения оптимальной последовательности выполнения задач для каждого агента. Таким образом проблема множественного распределения задач сводится к многоагентной задаче коммивояжёра (МКВ) (Multiple Travelling Salesman Problem, MTSP).

Многоагентная задача коммивояжёра (МКВ) состоит из двух взаимозависимых подзадач: назначение задач (или городов) отдельным коммивояжёрам, определение оптимального порядка выполнения этих задач каждым коммивояжёром. В научной литературе выделяют три ключевых подхода к решению МКВ, различающихся стратегией разбиения и маршрутизации: Метод совместной оптимизации [1-3], Подход "Сначала кластеризация, потом построение маршрутов" (Cluster-First,

Route-Second, CFRS) [4-6], Подход "Сначала построение маршрута, затем разбиение" (Route-First, Cluster-Second, RFCS) [7-9].

Концепция Cluster, Route, Connect, Split

Предлагаемый метод представляет собой гибридный подход, сочетающий сильные стороны двух известных концепций:

– Cluster-First, Route-Second (CFRS) — позволяет сократить пространство решений путём предварительного распределения задач;

– Route-First, Cluster-Second (RFCS) — обеспечивает эффективную балансировку нагрузки между агентами за счёт оптимизации маршрута целиком.

Метод состоит из четырёх ключевых этапов, указываемых ниже.

1) Кластеризация (Cluster). На этом этапе задачи (города) распределяются на кластеры. Цель — уменьшить размер пространства решений за счёт локализации маршрутов. Для кластеризации используется алгоритм K-Means [14] с числом кластеров, равным 4, что предварительно определено как разумный компромисс между качеством решения и временем вычислений.
2) Маршрутизация (Route). Для каждого полученного кластера строится внутренний маршрут с использованием муравьиного алгоритма [10] или других эвристических методов. Это позволяет предварительно оптимизировать маршруты внутри кластеров.
3) Соединение (Connect) После маршрутизации необходимо объединить кластеры в единый маршрут. Для этого в каждом кластере выбираются два узла, которые будут соединяться с соседними кластерами. Предлагаемая эвристика: для каждого кластера определяются два ближайших узла к соседним кластерам, минимизируя суммарную длину соединений.
4) Разделение (Split) Сформированный супермаршрут разбивается на подмаршруты, каждый из которых начинается и заканчивается в депо, и закрепляется за конкретным агентом (коммивояжёром). При разбиении учитываются такие факторы, как: балансировка нагрузки между агентами, ограничение на максимальную длину маршрута, равномерность распределения задач. Подробное описание алгоритма разбиения приведено в работе [11].

Суть предложенного метода заключается в том, чтобы объединить преимущество концепции Cluster-First, Route-Second в разделения задачи на несколько подзадач, уменьшая в итоге размера пространства решений и, следовательно, время расчета, и преимущество концепции Route-First, Cluster-Second в минимизации максимального по длине маршрута среди коммивояжёров.

Моделирование и Результаты

Для оценки эффективности предлагаемого метода и проведения сравнительного анализа его производительности с существующими подходами Cluster-First, Route-Second и Route-First, Cluster-Second были использованы три задачи из библиотеки эталонных задач коммивояжёра TSPLIB [12]: eil51, kroA100 и kroA150, содержащие соответственно 51, 100 и 150 городов. Для каждой задачи рассматривались три сценария с различным количеством коммивояжёров: 3, 5 и 10 агентов. Чтобы обеспечить достоверность результатов, каждый сценарий запускался по 100 раз, и результаты усреднялись для получения представительной выборки. Для сравнения были реализованы два эталонных метода:

Cluster-First, Route-Second: в качестве реализации этой концепции была выбрана работа Латаха [13].

Route-First, Cluster-Second: в качестве реализации этой концепции использована методика из работы [14].

Критерии оценки производительности указанных алгоритмов сводились к минимизациям следующих величин:

– времени расчета решения многоагентной задачи коммивояжёра.

– суммы пройденных коммивояжёрами путей

– максимального по длине пути среди путей, пройденных коммивояжёрами, для сравнения сбалансированности и равномерности распределения городов между коммивояжёрами.

На рисунке 1 показаны скрипочные диаграммы выигрыша в процентах по времени расчета, суммы длин путей и максимальной длины путей при использовании предлагаемого метода для каждой эталонной задачи.

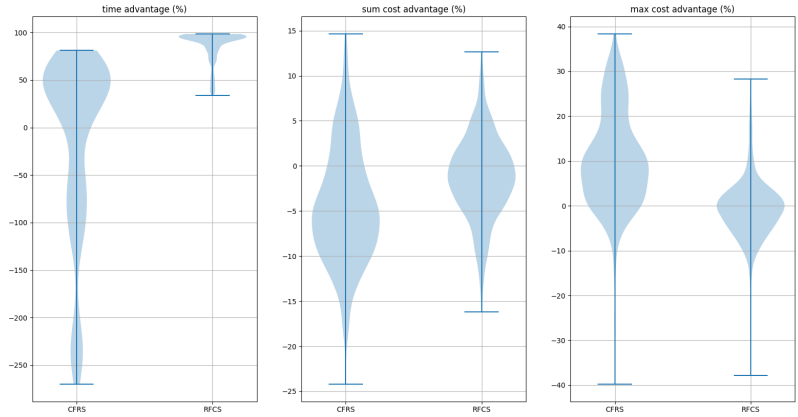


Рис. 1 Скрипичные диаграммы выигрыша при использования предлагаемого метода

Анализ полученных результатов расчета, представленных в указанных таблицах, показывает, что предложенный метод по сравнению с RFCS уменьшает время расчета на 88 – 2860%, а максимальная длина пути среди коммивояжёров уменьшается в среднем на 0.1 – 10 % для задач с 5 и 10 агентами и увеличивает в среднем на 2 – 5 % для задач с 3 агентами.

Предложенный метод по сравнению с CFRS уменьшает время расчета на 12 – 68% для задач с 3 и 5 агентами и увеличивает в среднем на 60 – 233 % для задач с 10 агентами, а максимальная длина пути среди коммивояжёров уменьшается в среднем на 1 – 26 %.

Заключение

В данной статье предлагается гибридный подход решения многоагентной задачи коммивояжера на основе уменьшения пространства решений. Проведено исследование предложенной методики на трех эталонных задачах коммивояжера с участием 3, 5, 10 агентов. Качество решения измерялось по 3 критериям: времени расчета решения, сумме расстояний маршрутов всех коммивояжеров, максимальной длине пути среди пройдённых всеми агентами маршрутов. Результаты были сравнены с традиционными подходами решения МКВ на основе муравьиного алгоритма. Статистический анализ результатов показал, что в среднем, предложенный метод предлагает хороший компромисс между временем расчета и качеством решения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. K. Sundar, S. Rathinam, Algorithms for heterogeneous, multiple depot, multiple unmanned vehicle path planning problems, J. Intell. Robot. Syst., Theory Appl. 88 (2–4) (2017) 513–526, http://dx.doi.org/10.1007/s10846- 016-0458-5.

2. M. Vali, K. Salimifard, A constraint programming approach for solving multiple traveling salesman problem, in: The Sixteenth International Workshop on Constraint Modelling and Reformulation, 2017.

3. Y. Shuai, S. Bradley, H. Shoudong, L. Dikai, A new crossover approach for solving the multiple travelling salesmen problem using genetic algorithms, European J. Oper. Res. (2013) 72–82.

4. Shabanpour M., Yadollahi M., Hasani M.M. A New Method to Solve the Multi Traveling Salesman Problem with the Combination of Genetic Algorithm and Clustering Technique, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.17 No.5, May 2017.

5. Basma H., Bashir H., Cheaitou A. A Novel Clustering Method for Breaking Down the Symmetric Multiple Traveling Salesman Problem, Journal of Industrial Engineering and Management JIEM, 2021, vol.14, no. 2.

6. Arthur D., Vassilvitskii S. K-Means++: The Advantages of careful seeding. Proceedings of the 8th annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms, 2007.

7. Beasley J.E. Route First - Cluster Second Methods for Vehicle Routing // Omega. 1983. Vol. 11, Issue 4, - P. 403-408

8. Bozdemir M. K., Bozdemir M., Burcu Ö. Route First- Cluster Second Method for Personal Service Routing Problem // Journal of Engineering Studies and Research. 2019. Vol. 25. No. 2. - P. 18-24.

9. F. A. Houssein, V. F. Kostyukov and I. D. Evdokimov, "A method for solving the multi-traveling salesman problem based on reducing the size of the solution space," 2024 10th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Vallette, Malta, 2024, pp. 1729-1733, doi: 10.1109/CoDIT62066.2024.10708116.

10. Dorigo M., Birattari M., Stutzle T. Ant colony optimization, IEEE Comput. Intell. Mag., 2006, pp. 28–39.

11. Хуссейн Ф.А., РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАЧ В МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ, Известия ЮФУ. Технические науки, no.4, 2024.

12. Ruprecht-Karls. TSPLIB. Available online: http://comopt.ifi.uni-heidelberg.de/software/TSPLIB95 (accessed on 4 August 2024).

13. Latah M. Solving multiple TSP problem by K-means and crossover based modified ACO algorithm, International Journal of Engineering Research and Technology, vol. 5, no. 02, 2016.

14. Костюков В.А., Хуссейн Ф.А., Евдокимов И.Д. Метод решения проблемы мульти-коммивояжёра в среде без препятствий на основе уменьшения размера пространства решений, Известия ЮФУ. Технические науки, no.1, 2024.

Костюков Владимир Александрович – АО «НКБ Робототехники и систем управления»; e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 88634371694; к.т.н.; научный руководитель.

Хуссейн Фирас Аймanович – АО «НКБ Робототехники и систем управления»; e-mail: firas94mecha@gmail.com; г. Таганрог, Россия; тел.: 89996379357; м.н.с.

Kostyukov Vladimir Aleksandrovich – Joint-Stock Company “Robotics and Control Systems” e-mail: wkost-einheit@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: 88634371694; can. of eng. sc.; senior researcher.

Houssein Firas Aimanovich – Joint-Stock Company “Robotics and Control Systems” e-mail: firas94mecha@gmail.com; Taganrog, Russia; phone: 89996379357; junior researcher.

УДК 004.896

Тимершин Булат Айратович

НИЗКОУРОВНЕВАЯ РАЗРАБОТКА РЕТРОФИТ-КОМПЛЕКТА ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ТРАКТОРА: РЕАЛИЗАЦИЯ БАЗОВОЙ СЕНСОРИКИ И КОММУНИКАЦИИ НА ПРИМЕРЕ МТЗ–112Н–01

В статье представлена низкоуровневая разработка ретрофит-комплекта для автоматизации трактора МТЗ-112Н-01. Особое внимание уделено аппаратно-программной части, обеспечивающей обработку данных от сенсорной системы и систем коммуникации. Предложенная архитектура комплекта обеспечивает реализацию кругового обнаружения препятствий, точного позиционирования и надежной системы связи на базе УКВ-радиомодема и GSM-2G модуля. Программная часть реализована на FreeRTOS с использованием аппаратных прерываний для обработки сенсорных данных.

Беспилотный трактор, ретрофит-комплект, stm32, freertos.

Timershin Bulat Ayratovich

LOW-LEVEL DEVELOPMENT OF RETROFIT KIT FOR UNMANNED TRACTOR: REALIZATION OF BASIC SENSORICS AND COMMUNICATION ON THE EXAMPLE OF MTZ-112N-01

The paper presents a low-level development of retrofit kit for automation of MTZ-112H-01 tractor. Special attention is paid to the hardware and software part, which provides data processing from the sensor system and communication systems. The proposed architecture of the set provides realization of circular obstacle detection, precise positioning and reliable communication system based on VHF-radiomodem and GSM-2G module. The software part is implemented on FreeRTOS using hardware interrupts for sensor data processing.

Unmanned tractor, retrofit kit, stm32, freertos.

Введение

Современное сельское хозяйство [1] требует внедрения автономных технологий для повышения эффективности, точности и снижения эксплуатационных затрат. Однако разработка новых беспилотных тракторов сопряжена с высокой стоимостью и длительными сроками внедрения. Альтернативой является ретрофитинг — модернизация существующей техники [2] с помощью специализированных аппаратно-программных комплексов.

В данной статье рассматривается низкоуровневая разработка ретрофит-комплекта для трактора МТЗ-112Н-01, обеспечивающего базовую сенсорику и коммуникацию в режиме реального времени. Ключевая особенность решения — двухуровневая архитектура вычислительного блока, где низкоуровневый блок на базе STM32H7 [3] и STM32F4 [4] используется для обработки данных с датчиков (сонары, лидары, камеры, GNSS, IMU) и управления исполнительными

механизмами (актуаторы, сервоприводы), а высокоуровневый блок - для навигации и машинного зрения. Такая архитектура была выбрана для обеспечения высокой автономности и гибкости системы, позволяющей эффективно распределять вычислительные задачи между компонентами.

Основная часть

Низкоуровневая архитектура ретрофит-комплекта построена на двух микроконтроллерах STM32H7 и STM32F4, обеспечивающих сбор данных с сенсоров, управление исполнительными механизмами и коммуникацию между компонентами системы (рисунок 1). Выбор STM32H7 обусловлен его высокой производительностью (до 480 МГц) и поддержкой критически важных интерфейсов (CAN, UART, SPI, I2C), а STM32F4 отвечает за обработку видеопотоков с аналоговых камер [5].

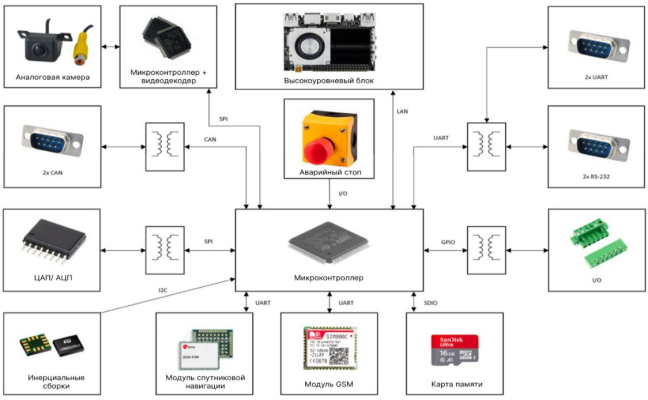


Рис. 1 Структурная схема низкоуровневого вычислительного блока, интерфейсы и варианты подключения различной периферии

Основу сенсорной подсистемы составляют восемь ультразвуковых сонаров автомобильного типа с рабочим диапазоном 0.1-2.2 метра и погрешностью измерения ±2.5 см. Сонары подключены через интерфейс CAN и расположены по периметру транспортного средства, формируя зону кругового обнаружения препятствий. Дополнительно установлены два лазерных дальномера TFmini Plus [6] с дальностью действия 0.1-12 метров, обеспечивающие высокоточное (±5 см) измерение дистанции в критически важных направлениях движения.

Аналоговые камеры подключены к системе через декодер видеосигнала ADV7180. Камеры передают видеосигнал по RCA-интерфейсу, который затем обрабатывается декодером. ADV7180 преобразует аналоговый сигнал в цифровой формат, что позволяет микроконтроллеру STM32F4 обрабатывать видеоданные через интерфейс DCMI. После предварительной обработки данные передаются на основной микроконтроллер STM32H7 через интерфейс SPI.

Навигационная подсистема включает GNSS-приемник ZED-F9P-01B [7] с поддержкой RTK-коррекции, обеспечивающий горизонтальную точность положения 1.5 м и вертикальную – 0.01 м. Для компенсации возможных потерь спутникового сигнала используется комплекс из четырех инерциальных измерительных модулей на базе акселерометров и гироскопов, подключенных через интерфейс I2C.

Для измерения скорости и пройденного пути разработана система одометрии на базе индуктивного датчика и ферромагнитного диска с отверстиями, установленного на приводном валу. Низкоуровневый блок вычисляет количество импульсов с индукционного датчика за единицу времени, на основе чего определяется текущая скорость трактора и пройденное расстояние.

Коммуникационная инфраструктура включает основной канал связи на базе УКВ-радиомодема "НЕВОД-5" с дальностью действия до 10 км [8] и резервный GSM-канал для передачи телеметрии. Обмен данными между вычислительными модулями осуществляется по разработанному протоколу, включающему 77-байтные пакеты с информацией о состоянии всех систем.

Для управления трактором с помощью дистанционного пульта предусмотрен радиоприёмник, подключённый S–BUS к UART, что обеспечивает ручное дистанционное управление трактором на расстоянии порядка 1 километра.

Особое внимание уделено вопросам электромагнитной совместимости. Силовая и управляющая платы физически разнесены, все интерфейсы связи оснащены гальванической развязкой, что обеспечивает устойчивую работу чувствительных сенсорных систем в условиях сильных электромагнитных помех.

Программно-аппаратная интеграция

Программная реализация системы основана на двух микроконтроллерах, работающих под управлением операционной системы реального времени FreeRTOS [9,10]. Архитектура построена по принципу модульных задач с приоритетным планированием, что обеспечивает детерминированное выполнение критически важных операций.

На блок-схеме (рисунки 2,3) изображен алгоритм работы сенсоров и датчиков, где реализованы следующие ключевые задачи:

– IMU1/IMU2 – обработка данных инерциальных модулей;

– GNSS – прием и парсинг NMEA-сообщений через UART-интерфейс с обработкой в прерываниях;

– LiDAR – управление лазерными дальномерами с настройкой параметров измерения расстояний через UART;

– FDCAN – обработка данных от ультразвуковых сонаров в прерываниях с проверкой CRC.

Особенностью реализации является использование аппаратных прерываний для обработки входящих данных сенсоров. Для GNSS и LiDAR применяется механизм приема по одному байту с последующей сборкой сообщения в

обработчике прерываний. Это позволяет минимизировать нагрузку на процессор при сохранении высокой частоты обновления данных.

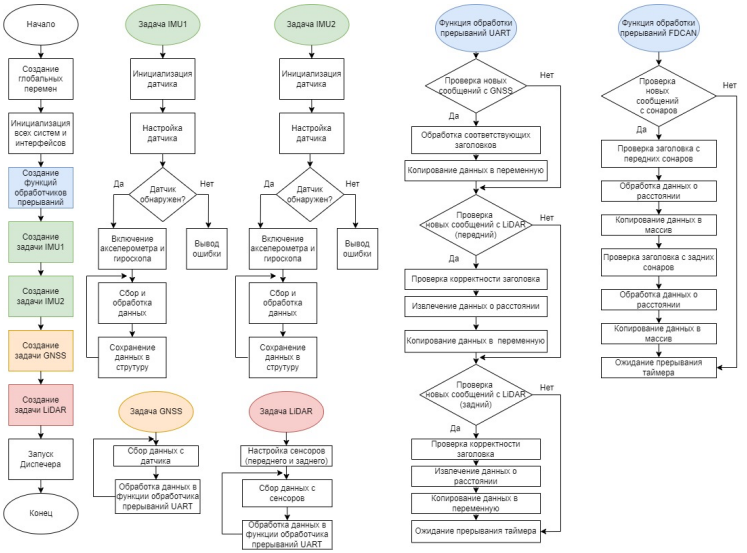


Рис. 2 Блок-схема работы сенсоров и датчиков (часть 1)

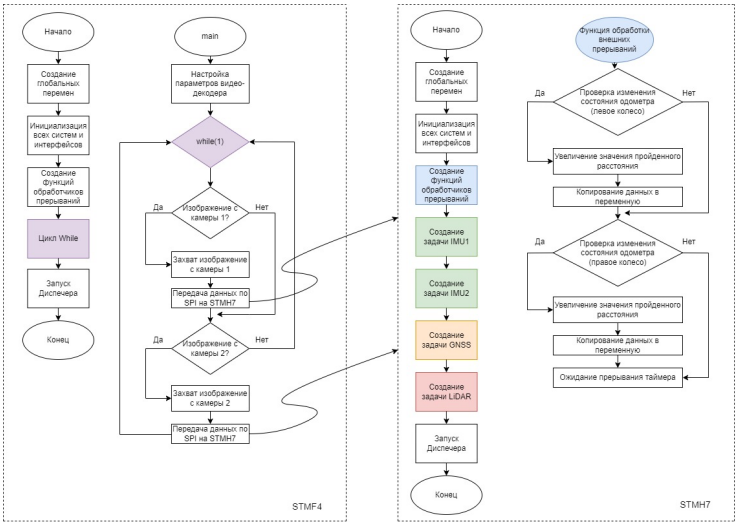


Рис. 3 Блок-схема работы сенсоров и датчиков (часть 2)

Микроконтроллер STM32F4 обрабатывает видеопотоки с камер через видеодекодер с последующей передачей по SPI на STM32H7 для дальнейшего анализа.

Одометрия реализована через обработку внешних прерываний от индуктивных датчиков колес. Каждое изменение состояния датчика вызывает прерывание, в котором обновляется счетчик импульсов.

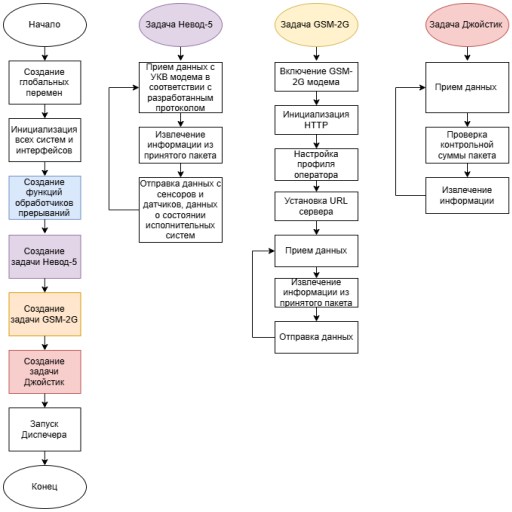


Рис. 4 Блок схема алгоритма работы систем связи и передачи данных

Алгоритм работы системы связи (рисунок 4) включает три независимых коммуникационных канала, работающих параллельно. Задача «НЕВОД-5» реализует основной УКВ-канал связи через радиомодем, предназначенной для проверки целостности входящих пакетов и отправки данных с обратной связью. Резервный GSM-канал активируется при потере УКВ-связи, используя GPRS-соединение для передачи критических параметров. Задача «Джойстик» отвечает за прием данных ручного управления с проверкой достоверности данных.

Реализованный программно-аппаратный подход обеспечивает надежную работу в условиях реальной эксплуатации при сохранении временных характеристик, критически важных для систем автономного управления.

Выводы

В статье представлена разработка базовой сенсорной системы и системы связи для ретрофит-комплекта на примере беспилотного трактора МТЗ-112Н-01. Ключевыми элементами системы стали: многоуровневая сенсорная платформа (сонары, лидары, GNSS и IMU), двухуровневая архитектура обработки данных на базе STM32H7/STM32F4, а также надежная система связи с основным УКВ-каналом и GSM-резервированием. Реализация программной части на FreeRTOS

позволила обеспечить детерминированную обработку сенсорных данных в реальном времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lui Z., Li J. Application of Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture // Agriculture, 2023. - №13. - p. 1-4.

2. Design and Testing of a WAAM Retrofit Kit for Repairing Operations on a Milling Machine / Campatelli G., Venturini G., Grossi N. [et al] // MDPI: Machines, 2021. - №9. – 16 p.

3. STM32H7 series // STMicroelectronics. URL: https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32h7-series.html (дата обращения: 10.05.2025).

4. STM32F411 series // STMicroelectronics. URL: https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f411ce.pdf (дата обращения: 10.05.2025).

5. Чикрин Д.Е., Тимершин Б.А. Оценки вычислительной сложности системы принятия решений беспилотных транспортных средств с использованием нейросетевых и классических алгоритмов // Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах/ Тезисы докладов. Саров, 2025.

6. TFmini Plus LiDAR Module // Benewake (Beijing) Co. URL: https://cdn.sparkfun.com/assets/1/4/2/1/9/TFmini_Plus_A02_Product_Manual_EN.pdf (дата обращения: 10.05.2025).

7. U-blox F9 high precision GNSS module // UBlox. URL: https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/ZED-F9P-01B_DataSheet_UBX-17051259.pdf (дата обращения: 10.05.2025).

8. НЕВОД-5-19200-DIN // Alphaplanets. URL: https://clck.ru/3Ly9ac (дата обращения: 10.05.2025).

9. Zhu M. Understanding FreeRTOS: A Requirement Analysis // CoreTek Systems, Inc, 2016. – URL: https://www.researchgate.net/publication/308692183_Understanding_FreeRTOS_A_Requirement_Analysis (дата обращения: 10.05.2025).

10. Курниц А. FreeRTOS — операционная система для микроконтроллеров // Компоненты и технологии, 2011. - №2. – с. 96-100.

Автор: Тимершин Булат Айратович, аспирант, специалист Центра интеллектуальных производств и аддитивных технологий ИИРСИ К(П)ФУ, Россия, город Казань, улица Салиха Сайдашева 12, к.3, телефон: +7 (9655) 88-84-76, email: btimershin99@xmail.ru.

Author: Timershin Bulat Ayratovich, post-graduate student, specialist of the Center of Intelligent Production and Additive Technologies of IIRSI K(P)FU, Russia, Kazan, Salikha Saydashev Street 12, b.3, phone: +7 (9655) 88-84-76, e-mail: btimershin99@xmail.ru.

УДК 629.1

Чикрин Дмитрий Евгеньевич
Галиуллин Искандер Гаязович
Густов Егор Сергеевич
Тимершин Булат Айратович
Пашин Дмитрий Михайлович
Шиндор Ольга Владимировна

СТРУКТУРНЫЕ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ДВУХУРОВНЕВОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ

В работе рассматриваются требования к беспилотным платформам для работы в реальных условиях. Представлена двухуровневая модель управления с разделением функций между низким и высоким уровнями. Описаны задачи подбора сенсоров, их интеграции и реализации машинного зрения на микроконтроллерах. Разработана универсальная печатная плата с интерфейсами для управления техникой. Испытания на мини-тракторе МТЗ-112Н-01 показали способность системы к автономному движению и обходу препятствий. Решение обеспечивает надежность, гибкость и энергоэффективность, открывая перспективы для применения в сельском хозяйстве и логистике.

Ключевые слова: беспилотная техника, машинное зрение, сенсорика, печатная плата, микроконтроллер, универсальная платформа, инерциальная навигация, автономное управление, двухуровневая архитектура, энергоэффективность.

Chikrin Dmitry Evgen’evich
Galiullin Iskander Gayazovich
Gustov Egor Sergeevich
Timershin Bulat Ayratovich
Pashin Dmitry Mikhailovich
Shindor Olga Vladimirovna

STRUCTURAL AND CIRCUIT DESIGN ASPECTS OF IMPLEMENTING A TWO-LEVEL COMPUTATIONAL CONTROL UNIT FOR AN UNMANNED VEHICLE

The article discusses requirements for unmanned platforms operating in real conditions. A two-level control model is presented, separating functions between low and high levels. Tasks of sensor selection, integration, and machine vision implementation on microcontrollers are described. A universal printed circuit board with interfaces for vehicle control was developed. Tests on the MTZ-112N-01 mini-tractor demonstrated the system’s capability for autonomous movement and obstacle avoidance. The solution provides reliability, flexibility, and energy efficiency, offering prospects for applications in agriculture and logistics.

Keywords: unmanned vehicle, machine vision, sensorics, printed circuit board, microcontroller, universal platform, inertial navigation, autonomous control, two-level architecture, energy efficiency.

Введение

Рост интереса к беспилотным системам обусловлен их применением в сельском хозяйстве, логистике и обороне [1, 2, 3]. Автономные платформы повышают эффективность, снижают затраты и минимизируют риски [4]. Однако существующие решения требуют сложной настройки и сталкиваются с проблемами совместимости [5]. Создание универсальных, гибких и энергоэффективных платформ — актуальная задача. Цель работы — разработка двухуровневого вычислительного блока управления беспилотным транспортным средством (БТС), объединяющего микроконтроллеры и ARM-архитектуру для надежного управления в реальном времени.

Основная часть

1. Концепция двухуровневой архитектуры.

Система разделена на низкоуровневый (НВБ) и высокоуровневый (ВВБ) блоки (рис. 1). НВБ на базе микроконтроллеров STM32H7 и STM32F4 выполняет сбор данных, управление механизмами и моментальные решения [6]. ВВБ (ARM-платформа, например, Khadas VIM4) отвечает за обработку данных, планирование маршрутов и связь с внешними системами [7].

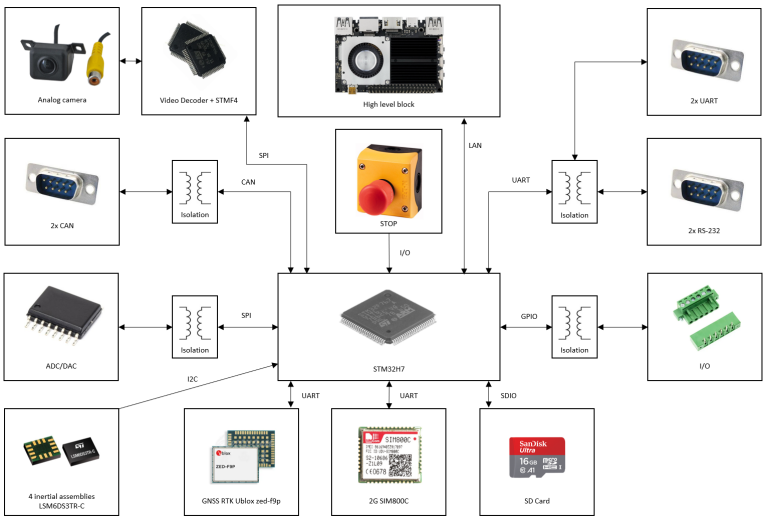


Рис. 1. Структурная схема низкоуровневого вычислительного блока

Двухуровневая архитектура была выбрана для обеспечения эффективного распределения вычислительных задач и повышения надежности системы управления БТС. Преимущества такого подхода включают:

- эффективное распределение ресурсов: НВБ обрабатывает критические задачи с минимальными задержками, тогда как ВВБ занимается ресурсоемкими вычислениями.
- повышенная надежность: Изоляция критических функций на НВБ снижает риск сбоев при перегрузке ВВБ.
- гибкость системы: ВВБ можно обновлять или расширять без вмешательства в НВБ, что упрощает внедрение новых алгоритмов.

НВБ поддерживает до 14 цифровых входов/выходов, 4 PWM-канала, интерфейсы RS232, UART, CAN, LAN Ethernet (10/100 Мбит/с) и аналоговые преобразователи. Все интерфейсы имеют гальваническую развязку для защиты от помех. GNSS-модуль с RTK и инерциальные датчики обеспечивают точную навигацию [8].

ВВБ обрабатывает видеопотоки от цифровых камер, данные лидаров и модемов 3G/4G, планирует маршруты и координирует действия (рис. 2). Ethernet-соединение между уровнями гарантирует высокую скорость и надежность передачи данных [9].

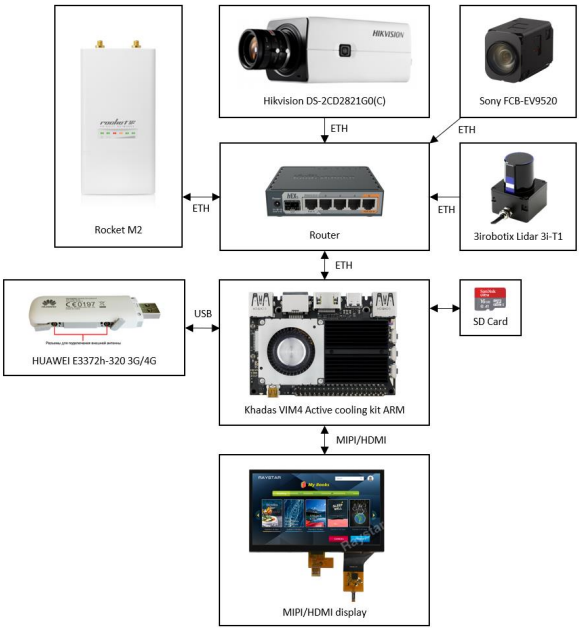


Рис. 2. Структурная схема высокоуровневого вычислительного блока

2. Реализация на мини-тракторе МТЗ-112Н-01

НВБ интегрирован с 8 сонарами, 2 лазерными дальномерами и 2 аналоговыми камерами. Силовая плата управляет педалями и электроникой трактора. Для измерения скорости и пройденного расстояния был разработан одометр на базе индуктивного датчика и диска с отверстиями, установленного на валу колеса. Это позволило получать точные данные о движении в отсутствие штатного одометра.

Процесс интеграции включал создание силовой платы для управления электроникой и навесным оборудованием, с учетом гальванической развязки интерфейсов для защиты от помех. Основные трудности возникли с:

- Совместимостью интерфейсов между сенсорами и механизмами.
- Обеспечением стабильной связи в условиях вибраций и электромагнитных помех.

Эти проблемы были решены использованием стандартизированных протоколов (CAN, UART) и тщательной калибровкой оборудования.

Координатор на базе ПК с Windows 11 и GUI на Qt Creator отображает данные сенсоров, карту и статус техники. Связь обеспечивают радиомодем «Невод-5» (RS232), модем «MikroTik LtAP mini LTE kit» (LAN) и пульт «Flysky» (S-BUS, UART).

3. Испытания и результаты

Испытания на асфальтированной дороге показали, что система успешно следует маршрутам («круг», «восьмерка»), обходит препятствия и останавливается при появлении человека. Скорость не превышала 8 км/ч. Алгоритмы машинного зрения эффективно обрабатывают данные камер, а GNSS с RTK обеспечивает сантиметровую точность [10].

Таблица 1

Параметры испытаний

Параметр	Значение
Скорость, км/ч	5
Точность позиционирования, см	5
Время реакции на препятствие, с	1
Дальность связи (пульт), м	1500
Дальность связи (УКВ), м	3000

Выводы

Разработана двухуровневая система управления БТС, обеспечивающая автономность, надежность и гибкость. НВБ эффективно управляет сенсорами и механизмами, ВВБ — планирует маршруты и обрабатывает данные. Испытания

подтвердили работоспособность системы. Планируется разработка конфигуратора для упрощения настройки, что сделает решение доступным для широкого круга разработчиков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lui Z., Li J. Application of Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture // Agriculture. — 2023. — №13. — С. 1-4.
2. Raouhi E.M., Lachgar M., Hrimech H. Unmanned Aerial Vehicle-based Applications in Smart Farming: A Systematic Review // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. — 2023. — №14. — С. 1150-1165.
3. Lee H., Lee C. Research on logistics of intelligent unmanned aerial vehicle integration system // Journal of Industrial Information Integration. — 2023. — №36. — С. 1-15.
4. Hildawati S.K., Purwantoro S., Duarte E.P. et al. The Role of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Indonesian Air Defense Management // International Journal Of Humanities Education And Social Sciences. — 2024. — №4. — С. 1808-1819.
5. Wang Z., Wu Y., Niu Q. Multi-Sensor Fusion in Automated Driving: A Survey // IEEE Access. — 2019. — №8. — С. 2847-2868.
6. Saha S.S., Srivastava M. Machine Learning for Microcontroller-Class Hardware: A Review // IEEE SENSORS JOURNAL. — 2022. — №22. — С. 21362-21390.
7. Douklias A., Karagiannidis L., Misichroni F., Amditis A. Design and Implementation of a UAV-Based Airborne Computing Platform for Computer Vision and Machine Learning Applications // Sensors. — 2022. — №22. — С. 1-18.
8. Qingqing L., Queralta J.P., Gia T.N. et al. Multi-Sensor Fusion for Navigation and Mapping in Autonomous Vehicles // Unmanned Systems. — 2020. — №3. — С. 229-237.
9. Manor E., Greenberg S. Custom Hardware Inference Accelerator for TensorFlow Lite for Microcontrollers // IEEE Access. — 2022. — №10. — С. 73484-73493.
10. Wang T., Chen B., Zhang Z. et al. Applications of machine vision in agricultural robot navigation: A review // Computers and Electronics in Agriculture. — 2022. — №198. — С. 1-13.

Автор: Чикрин Дмитрий Евгеньевич, д.т.н., профессор, директор Института искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии, КФУ, 420021, Россия, Казань, ул. С. Сайдашева, 12к3, email: dmitry.kfu@ya.ru, тел.: +79172727100.

Галиуллин Искандер Гаязович, соискатель, директор кадрово-ресурсного центра, КФУ, 420021, Россия, Казань, ул. С. Сайдашева, 12к3, email: isgaliullin@gmail.com, тел.: +79046714294.
Густов Егор Сергеевич, аспирант, техник-проектировщик, КФУ, 420021, Россия, Казань, ул. С. Сайдашева, 12к3, email: jegorustow@gmail.com, тел.: +89274412312.
Тимершин Булат Айратович, аспирант, техник-программист, КФУ, 420021, Россия, Казань, ул. С. Сайдашева, 12к3, email: btimershin99@xmail.com, тел.: +89655888476.
Пашин Дмитрий Михайлович, д.т.н., профессор, проректор, КФУ, 420008, Россия, Казань, ул. Кремлевская, 18, email: DMPashin@kpfu.ru, тел.: +78432337871.
Шиндор Ольга Владимировна, к.т.н., специалист, КФУ, 420021, Россия, Казань, ул. С. Сайдашева, 12к3, email: OVShindor@kpfu.ru, тел.: +89270301494.
Author: Chikrin Dmitry Evgen'evich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Artificial Intelligence, Robotics and Systems Engineering, KFU, 420021, Russia, Kazan, S. Saidasheva st., 12k3, email: dmitry.kfu@ya.ru, tel.: +79172727100.
Galiullin Iskander Gayazovich, PhD Candidate, Director of HR Center, KFU, 420021, Russia, Kazan, S. Saidasheva st., 12k3, email: isgaliullin@gmail.com, tel.: +79046714294.
Gustov Egor Sergeevich, Postgraduate, Design Technician, KFU, 420021, Russia, Kazan, S. Saidasheva st., 12k3, email: jegorustow@gmail.com, tel.: +89274412312.
Timershin Bulat Ayratovich, Postgraduate, Programmer Technician, KFU, 420021, Russia, Kazan, S. Saidasheva st., 12k3, email: btimershin99@xmail.com, tel.: +89655888476.
Pashin Dmitry Mikhailovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector, KFU, 420008, Russia, Kazan, Kremlevskaya st., 18, email: DMPashin@kpfu.ru, tel.: +78432337871.
Shindor Olga Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Specialist, KFU, 420021, Russia, Kazan, S. Saidasheva st., 12k3, email: OVShindor@kpfu.ru, tel.: +89270301494.

УДК 629.5.05

Мурин Ян Сергеевич

ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ АППАРАТОМ КЛАССА МИКРО

В работе рассматриваются вопросы разработки и реализации системы управления телеуправляемым необитаемым подводным аппаратом (ТНПА) микро-класса. Цель исследования заключается в построении алгоритмического и аппаратного обеспечения для управления подводным аппаратом. Задачи работы включают разработку пульта управления на базе микроконтроллера ESP32, реализацию калибровки его компонентов, формирование и передачу управляющих пакетов данных по протоколу UDP, а также обработку сигналов и формирование команд для исполнительных механизмов подводного блока. Представленная система позволяет осуществлять управление перемещением ТНПА в трёх степенях свободы.

Ключевые слова: телеуправляемый необитаемый подводный аппарат, система управления, пульт управления, микроконтроллер, протокол UDP, алгоритм калибровки.

Murin Yan Sergeevich

CONSTRUCTION OF CONTROL ALGORITHMS FOR A REMOTELY CONTROLLED UNMANNED UNDERWATER VEHICLE OF THE MICRO CLASS

The paper discusses the development and implementation of a micro-class remote-controlled uninhabited underwater vehicle (TNFA) control system. The purpose of the research is to build algorithmic and hardware for controlling an underwater vehicle. The tasks of the work include the development of a control panel based on the ESP32 microcontroller, the implementation of calibration of its components, the formation and transmission of control data packets over the UDP protocol, as well as signal processing and command generation for the actuators of the underwater unit. The presented system allows you to control the movement of the fuel pump in three degrees of freedom.

Keywords: remote-controlled uninhabited underwater vehicle, control system, control panel, microcontroller, udp protocol, calibration algorithm.

Введение

Управление техническими средствами в подводной среде представляет собой сложную инженерную задачу. В условиях значительного влияния гидродинамических факторов и сложностей передачи управляющих сигналов традиционные подходы к дистанционному управлению не могут использоваться для управления телеуправляемым необитаемым подводным аппаратом (ТНПА).

В работе [1] представлен вариант использования кабеля для передачи управляющих команд для исполнительных механизмов.

Так, алгоритм был разделен на три ключевые стадии:

1) Формирование пакетов данных на управляющем устройстве.
2) Прием пакетов и их обработка блоком управления.
3) Формирование управляющих команд для подводного блока.

Основная часть

Аппаратная реализация управляющего устройства представляет собой пульт управления, основанный на ESP32, оснащённый двумя аналоговыми стиками типа KY-023, двумя однопозиционными кнопками и двумя светодиодными индикаторами. Принцип работы устройства аналогичен промышленным вариантам пультов дистанционного управления для БПЛА мультироторного типа, однако адаптирован с учётом специфики задач по управлению перемещением подводного блока ТНПА.

Левый аналоговый стик предназначен для управления вертикальным перемещением подводного блока − погружением и всплытием, тогда как правый стик обеспечивает контроль за поворотом вокруг вертикальной оси и продольным движением подводного блока вперёд/назад. Кнопки реализуют функцию управления навесным оборудованием подводного блока ТНПА. Светодиодные индикаторы отображают текущие режимы работы пульта дистанционного управления.

Перед началом формирования пакетов данных проводится процедура калибровки дискретных значений компонентов пульта управления − аналоговых стиков и однопозиционных кнопок. Режим калибровки активируется автоматически сразу после подачи питания на микроконтроллер ESP32. В рамках данной процедуры в течение одной секунды осуществляется опрос значений состояния цифровых входов, соответствующих кнопок. После этого формируется два массива посредством 50 последовательных измерений, каждого стика снимаемого на выходе аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Учитывая вариации исходных данных АЦП в диапазоне [0; 4095], осуществляется их нормировка к диапазону [-100; 100] для удобства дальнейшей работы. Минимальное и максимальное значение по абсолютной величине каждого массива определяют границы допустимого диапазона дребезга, соответствующего конкретному стику. Полученные дискретные значения записываются в оперативную память устройства для последующей обработки.

Формирование пакетов данных осуществляется путём последовательного наращивания их длины после каждой итерации опроса компонентов пульта управления. По завершении формирования пакета измеряется его фактическая длина, которая затем записывается в конец пакета.

После формирования данных, содержащих информацию о командах оператора, пакет передаётся на блок управления по протоколу UDP на отладочную плату ESP32. Использование протокола UDP обусловлено его высокой скоростью передачи данных и минимальным использованием ресурсов микроконтроллера. Отсутствие необходимости подтверждения доставки позволяет минимизировать задержки, обеспечивая оперативное реагирование на

команды оператора [2]. При этом контроль целостности принимаемых данных обеспечиваются на уровне блоке управления.

В блоке управления входной пакет данных разбивается на две части: информация о состоянии аналоговых стиков и кнопок и дополнительные данные. Из дополнительных данных извлекается контрольная сумма и соотносится с фактической длиной пакета.

Извлечённые значимые данные передаются на микроконтроллер STM32, который формирует управляющие сигналы для исполнительных механизмов подводного блока. Структурная схема ТНПА представлена на рис. 1, работа которой определяется описанным выше алгоритмом.

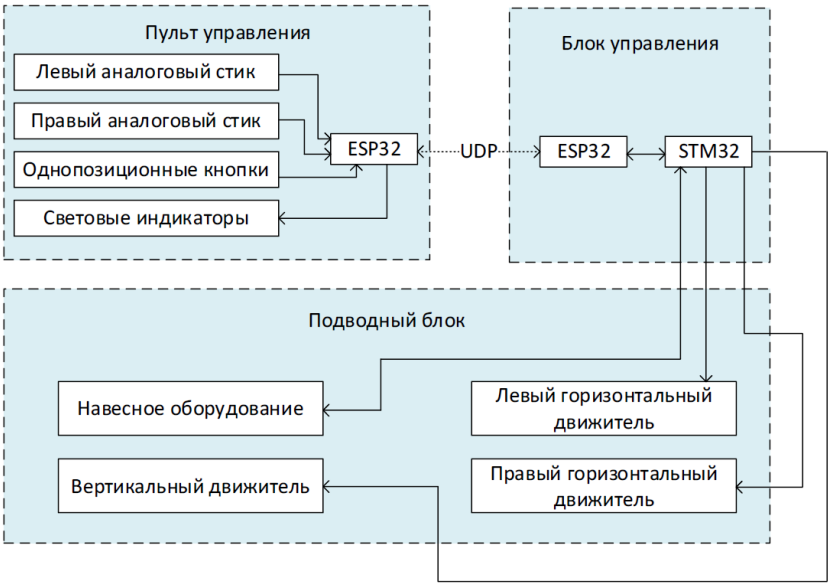


Рис. 1 Структурная схема ТНПА

На рис. 2. представлен внешний вид подводного блока, который выполнен в виде жёсткого каркаса, на котором размещены три движителя. Один из них установлен в верхней части каркаса и предназначен для обеспечения вертикального перемещения устройства − погружения и всплытия. Направление движения по вертикальной оси определяется направлением вращения движителя: вращение по часовой стрелке создаёт тягу, направленную вниз (погружение), а вращение против часовой стрелки − вверх (всплытие).

Два горизонтальных движителя расположены симметрично на боковых стенках каркаса и обеспечивают выполнение двух функций: горизонтальное продольное перемещение (вперёд/назад) и управляемый поворот вокруг вертикальной оси. Продольное движение реализуется при одновременной работе обоих боковых движителей в противоположных направлениях, что создаёт суммарную тягу вдоль продольной оси аппарата.

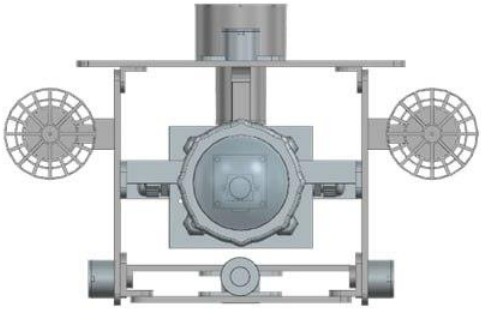


Рис. 2 Внешний вид подводного блока

Вращение вокруг вертикальной оси, осуществляется за счёт разницы в скоростях вращения левого и правого движителей. При увеличении оборотов одного движителя и уменьшении оборотов другого возникает поворот блока в горизонтальной плоскости в сторону меньшей тяги. Таким образом, рысканье достигается за счёт несимметричной работы боковых двигателей, когда один вращается быстрее, а второй − медленнее.

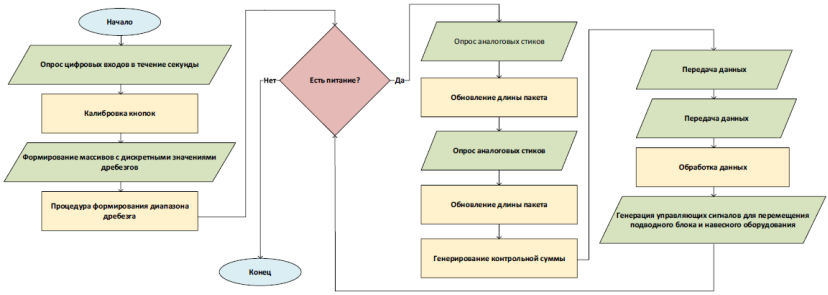


Рис. 3 Алгоритм работы ТНПА

Выводы

Сравнивая полученный алгоритм (рис. 3.) с алгоритмом, представленный в работах [3-4], можно выделить его вычислительную

эффективность за счёт минимума операций. В отличие от более сложных схем, требующих значительных ресурсов микроконтроллера, предложенный алгоритм характеризуется минимальной вычислительной нагрузкой, что особенно актуально для ТНПА класса микро, обладающих ограниченными аппаратными возможностям. Полученный алгоритм использует радиоканал для управления ТНПА, минимизируя задержки, что позволяет эксплуатировать подводный аппарат в условиях стеснённой акватории и при сложных подходах к месту погружения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Филаретов, В. Ф. Подход к разработке информационно-управляющей системы для телеуправляемых подводных аппаратов / В. Ф. Филаретов, А. Ю. Коноплин, Н. Ю. Коноплин // Подводные исследования и робототехника. – 2017. – № 1(23). – С. 44-49. – EDN ZBHKQP.

2. Пузырев, Е. И. UDP протокол / Е. И. Пузырев, Н. Г. Нефедов, Д. А. Степанов // Проблемы развития современного общества : Сборник научных статей 8-й Всероссийской национальной научно-практической конференции. В 4-х томах, Курск, 19–20 января 2023 года / Под редакцией В.М. Кузьминой. Том 3. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2023. – С. 320-323. – EDN ETDJZL.

3. Костенко В. В., Михайлов Д. Н. Разработка телеуправляемого подводного аппарата" МАКС-300" //Подводные исследования и робототехника. – 2012. – №. 1. – С. 36-45.

4. Куценко Алексей Сергеевич, Егоров Сергей Александрович Организация движения телеуправляемого подводного аппарата по заданной траектории // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. №11 (11). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-dvizheniya-teleupravlyaemogo-podvodnogo-apparata-po-zadannoy-traektorii (дата обращения: 19.05.2025).

Автор: Мурин Ян Сергеевич, студент 2 курса Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, город Казань, Кремлевская, 18к1 420008, телефон: +7 (939) 369-67-81, email: murin007@list.ru.

Author: Murin Yan Sergeevich, 2nd year student, Kazan (Volga Region) Federal University, 18k1 Kremlevskaya Street, Kazan, Russia, 420008, phone: +7 (939) 369-67-81, email: murin007@list.ru .

УДК 62-529

Абдрахманов Шарифжан Ришатович

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ МАЛОГАБАРИТНЫХ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БПЛА

В работе представлена методика оптимизации параметров ПИД-регуляторов для стабилизации малогабаритных мультироторных БПЛА с рамой 140×140 мм. Разработанный подход включает последовательную настройку P, I и D составляющих регулятора, а также оптимизацию дополнительных параметров платформы Betaflight. Методика может быть применена при разработке и настройке малогабаритных БПЛА различного назначения.

Ключевые слова: БПЛА, квадрокоптер, ПИД-регулятор, стабилизация полета, Betaflight, автоматическое управление, настройка параметров, малогабаритный беспилотник, система стабилизации.

Abdrakhmanov Sharifzhan Rishatovich

OPTIMIZATION OF PID CONTROLLER PARAMETRS FOR STABILIZATION OF SMALL-SIZED UAV

This paper presents a methodology for optimizing PID controller parameters for small-sized multirotor UAVs with a 140×140 mm frame. The developed approach includes sequential tuning of P, I, and D components, as well as optimization of additional Betaflight platform parameters. The methodology can be applied in the development and configuration of small-sized UAVs for various purposes.

Keywords: UAV, quadcopter, PID controller, flight stabilization, Betaflight, multirotor drone, automatic control, parameter tuning, small-sized drone, stabilization system.

Введение

Мультироторные беспилотные летательные аппараты (квадрокоптеры, гексакоптеры, октокоптеры) широко применяются в экологическом мониторинге, логистике, геодезии и военных операциях благодаря маневренности, простоте конструкции и способности работать в труднодоступных местах. Однако их стабильное управление осложняется необходимостью компенсации внешних возмущений и поддержания устойчивости траектории [1], особенно для малогабаритных БПЛА.

Ключевым элементом системы управления таких аппаратов являются пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы, эффективность которых подтверждена многочисленными исследованиями [2]. Несмотря на структурную простоту и адаптивность, настройка коэффициентов ПИД-регуляторов требует учета множества факторов: аэродинамических сил, инерционных характеристик и внешних воздействий [3].

Существующие методики настройки часто неэффективны для малогабаритных БПЛА из-за их специфических динамических характеристик [5]. Цель данной работы – разработка методики стабилизации полета мультироторного БПЛА с рамой 140×140 мм на основе оптимизации параметров ПИД-регуляторов.

Основная часть

ПИД-регуляторы являются ключевым элементом системы стабилизации мультироторных БПЛА, обеспечивая управление по трем основным осям: крен (Roll), тангаж (Pitch) и рыскание (Yaw). Каждая составляющая ПИД-регулятора выполняет специфическую функцию в процессе стабилизации [3]:

1. пропорциональная составляющая (P) отвечает за скорость реакции системы на отклонение от заданного положения. Высокие значения P обеспечивают быструю реакцию, но могут вызывать колебания и перерегулирование;
2. интегральная составляющая (I) накапливает ошибку с течением времени и компенсирует статическое отклонение, вызванное постоянными внешними воздействиями, такими как ветер или неравномерное распределение массы;
3. дифференциальная составляющая (D) реагирует на скорость изменения ошибки и действует как "тормоз", предотвращая перерегулирование и уменьшая колебания.

Эффективность ПИД-регулятора напрямую зависит от правильного подбора этих коэффициентов, что представляет собой нетривиальную задачу, особенно для малогабаритных БПЛА с их специфическими динамическими характеристиками [4].

В области настройки ПИД-регуляторов для БПЛА существует несколько подходов, каждый из которых имеет свои особенности и области применения.

Традиционные методы настройки, такие как метод Зиглера-Никольса [5] и метод Chien-Hrones-Reswick (CHR) [6], основаны на экспериментальном определении критических параметров системы и последующем вычислении коэффициентов регулятора. Эти методы широко применяются в промышленности, но требуют адаптации для использования в БПЛА.

Современные подходы включают использование адаптивных ПИД-регуляторов, которые автоматически корректируют свои параметры в зависимости от условий полета [7]. Также активно развиваются методы, основанные на нечеткой логике и машинном обучении [8]. Однако эти подходы требуют значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их применение в малогабаритных БПЛА с ограниченной мощностью бортовых компьютеров.

Предлагаемая методика стабилизации полета БПЛА мультироторного типа основана на комбинированном подходе, учитывающем специфику малогабаритных квадрокоптеров и программной платформы Betaflight. В качестве тестовой платформы использовался БПЛА с рамой 140×140 мм со следующей конфигурацией аппаратной платформы:

– полётный контроллер на базе STM32F7;
– бесколлекторные двигатели 1104-4300KV;
– пропеллеры Gemfan 3016 (3 дюйма, 3-лопастные);
– аккумулятор LiPo, 3S, 850mAh;
– протокол управления ESC: DShot600.

Методика включает последовательную настройку:

1. первичная настройка полетного контроллера (калибровка, выбор базовых параметров);
2. настройка P-составляющей для каждой оси с постепенным увеличением до появления вибраций и последующим уменьшением на 10-15%;
3. настройка D-составляющей для Roll и Pitch до устранения перерегулирования;
4. настройка I-составляющей для всех осей до устранения дрейфа;
5. оптимизация дополнительных параметров (TPA, Anti Gravity Gain, RC Rate) управления.

В результате применения разработанной методики были получены следующие оптимальные значения параметров ПИД-регуляторов для БПЛА на раме 140×140 мм:

- основные параметры PID-регулятора: Roll: P = 45, I = 80, D = 30; Pitch: P = 47, I = 84, D = 34; Yaw: P = 45, I = 80, D = 0.
- дополнительные параметры: Anti-Gravity Gain: 4,0; TPA Rate: 50%; TPA Breakpoint: 1500
- Rate-профиль: RC Rate (Roll/Pitch/Yaw): 1,0; Super Rate (Roll/Pitch/Yaw): 0,7; RC Expo: 0,03.

Экспериментальные испытания проводились в помещении (базовые характеристики) и на открытом воздухе (воздействие ветра до 5 м/с). Тестировались различные режимы полета: зависание, резкие маневры, полет с переменной высотой и в режиме ACRO.

На основе проведенных исследований и экспериментов можно сформулировать следующие практические рекомендации по применению разработанной методики:

1. начальные значения параметров следует выбирать установленные в конфигураторе по умолчанию, которые подбираются автоматически;
2. последовательность настройки (P → D → I) является оптимальной для большинства малогабаритных БПЛА и позволяет достичь наилучших результатов с минимальными затратами времени;
3. контроль температуры двигателей необходимо проводить после каждого тестового полета, особенно при увеличении D-составляющей, так как высокие значения D могут приводить к перегреву двигателей;
4. настройка дополнительных параметров (TPA, Anti Gravity Gain и др.) должна проводиться после базовой настройки PID-регуляторов и может значительно улучшить поведение БПЛА в специфических условиях;
5. тестирование в различных условиях является обязательным этапом настройки, так как поведение БПЛА может существенно различаться в помещении и на открытом воздухе.

Выводы

Разработанная методика оптимизации параметров ПИД-регуляторов для стабилизации малогабаритных мультироторных БПЛА обеспечивает высокую точность стабилизации в различных условиях эксплуатации.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке и настройке систем управления малогабаритными БПЛА для различных прикладных задач, включая аэрофотосъемку, мониторинг, доставку грузов и развлекательные полеты. Предложенная методика обеспечивает оптимальный баланс между точностью стабилизации, отзывчивостью управления и энергоэффективностью, что делает ее предпочтительной для использования в малогабаритных БПЛА с ограниченными вычислительными ресурсами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мельник М.А. Виды БПЛА и их возможности // Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. – М.: 2023. – С. 45-52.

2. Васильченко Д.В., Неклюдов А.Л., Левин В.С., Башарина Т.А., Ромащенко М.А. Разработка универсального ПИД-регулятора с изменяемыми коэффициентами // Вестник технических наук. – 2022. – № 4. – С. 112-118.

3. Портнов М.О., Третьяков В.Ю. Программа настройки коэффициентов ПИД-регулятора системы управления БПЛА мультироторного типа // Труды Всероссийской научной конференции по автоматизации. – Казань: КГТУ, 2023. – С. 89-95.

4. Шишков И.А. Программа автоматического подбора коэффициентов ПИД-регулятора для соответствия желаемой характеристике // Известия вузов. Приборостроение. – 2021. – № 6. – С. 78-85.

5. Коломыцев В.Г., Рустамханова Г.И. Модификация временного метода Зиглера – Никольса и оптимизация параметров ПИД-регуляторов средствами MATLAB // Автоматика и программная инженерия. – 2020. – № 3(33). – С. 23-31.

6. Голдинова К.А. Сравнительный анализ методов подбора параметров ПИД-регулятора // Вестник современных цифровых технологий. – 2022. – № 2. – С. 45-53.

7. Горячев О.В., Калиничев К.Н. Анализ методов настройки, оптимизации и адаптации ПИД-регуляторов // Автоматизация в промышленности. – 2021. – № 5. – С. 67-74.

8. Беррекси Р., Толоконский А.О., Лаидани З., Абдулрахим К.К., Кудратов В.Н. Применение нечеткой логики в системах реального времени на базе программно-технического комплекса УМИКОН // Программные продукты и системы. – 2022. – № 3. – С. 112-120.

9. Магомедов, И. А. Математическая и аппаратная поддержка логико-лингвистических моделей управления сложными динамическими объектами / И. А. Магомедов, Г. Х. Ирзаев; Дагестанский государственный технический университет. – Махачкала: [б. и.], 2025. – 1 электронный оптический диск (CD-ROM).

10. Толочко, Н. К. Особенности проектирования мультикоптеров-опрыскивателей / Н. К. Толочко, Н. Н. Романюк, В. Н. Еднач, Д. В. Виноградов, К. Д. Сазонкин // Научный журнал современных исследований в области авиационных технологий. – 2023. – № 1. – С. 45-52.

11. Гудаев, И. И. Синтез цифрового ПИД-регулятора методом анализа параметров аналогового ПИД-регулятора / И. И. Гудаев, М. В. Дударев // Научный журнал по автоматике и системотехнике. – 2024. – № 5. – С. 67-75.

12. Адаптивный нечёткий ПИД-регулятор системы управления углом наклона лопасти ветрогенератора / А. Шукирова, Г. Ускенбаева, Л. Рзаева, Ж. Абдугулова, А. Наурызбаева // Вестник Казахской академии транспорта, связи и новых технологий. Серия: Автоматика, связь и информационные технологии. – 2022. – № 2 (121). – С. 580–590.

13. Метод гибридного управления в интеллектуальных системах на основе ПИД и ПИД-fuzzy-регуляторов / В. В. Игнатьев, О. Б. Спиридонов, В. В. Курейчик, А. В. Ковалев, А. С. Игнатьева // Научно-технический журнал «Вестник» (Южный федеральный университет). – 2023. – № 4. – С. 72-81.

14. Айтбаева, З. К. Программирование контроллеров и параметров. ПИД-регулирование температуры / З. К. Айтбаева; Таразский государственный университет им. М.Х. Дулати. – Тараз: [б. и.], 2023. – 1 электронный ресурс (CD-ROM).

Автор: Абдрахманов Шарифжан Ришатович, бакалавр, Института искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии Казанского (Приволжского) федерального университета, Россия, город Казань, улица Салиха Сайдашева 12 корпус 3, 420021, телефон: +7 (909) 993 9011, email: Maylzmaraliz@gmail.com

Author: Abdrakhmanov Sharifzhan Rishatovich, Bachelor's degree, Institute of Artificial Intelligence, Robotics and System Engineering, Kazan (Volga Region) Federal University, 12 Salikh Saidashev Street, building 3, 420021, Kazan, Russia, phone: +7 (909) 993 9011, email: Maylzmaraliz@gmail.com

УДК 681.57

Кокунин Петр Анатольевич
Хурматуллин Даниф Фанилевич

АЛГОРИТМЫ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ПЛАТФОРМАМИ НА ПРИМЕРЕ РОБОТА-СУМО

В данной работе рассматриваются алгоритмы автономного управления беспилотными платформами (БП), реализуемые на примере робота-сумо. Для разработки алгоритма и последующей его программной реализации необходимо определить требования к работе БП, которые определяются назначением платформы и условиями эксплуатации. В работе рассматривается проблема и создания полностью автономных систем управления для соревновательной робототехники. Представлен алгоритм управления роботом-сумо, обеспечивающий проведение соревнований типа «битва роботов» в полностью автономном режиме.

Ключевые слова: беспилотная платформа (БП), алгоритм автономного управления, робот-сумо

Kokunin Petr Anatolevicn
Khurmatullin Danif Fanievich

AUTONOMOUS CONTROL ALGORITHMS OF UNMANNED PLATFORMS AS THE EXAMPLE OF A SUMOROBOT

In this paper, algorithms for autonomous control of unmanned platforms (UP) are considered, implemented using the example of a sumo robot. To develop the algorithm and its subsequent software implementation, it is necessary to determine the requirements for the operation of the PS, which are determined by the purpose of the platform and the operating conditions. The paper also examines the problem of creating fully autonomous control systems for competitive robotics. The sumo robot control algorithm is presented, which ensures the holding of "battle of robots" type competitions in a completely autonomous mode.

Keywords: unmanned platform (UP), autonomous control algorithm, sumo robot

Введение

При разработке алгоритма автономного управления необходимо определить требование к работе самой платформы [1], в нашем случае требования, формируются на базе следующих данных:

- платформа представляет собой робот сумо, который предназначен для участия в соревнования битва роботов в категории мини-сумо [2];

- соревнования проводятся в полностью автономном режиме, т.е. роботы устанавливаются на свои стартовые позиции на поле для проведения соревнований, включатся и дальнейшая работа робота должно осуществляться в полностью автономном режиме;

- для максимизации вероятности победы в соревнованиях необходимо обеспечить преимущество разрабатываемой платформы, по сравнению с соперником, которое может быть обеспечено за счет быстродействия разрабатываемого алгоритма и надежной его работы.

Требования к алгоритму определяются правилами соревнований. Основная задача робота-сумоиста — обнаружить противника и вытолкнуть его за ринг, оставаясь внутри. Автономность предполагает, что после запуска робот сам ищет противника, распознает границы и принимает решения о движении. Соревнования мини-сумо — идеальный полигон для разработки и тестирования автономных алгоритмов, так как требуют быстрой реакции на изменения, принятия решений в условиях неопределенности и выполнения задач без вмешательства человека.

Описание робота – сумо

Далее, на рисунке 1, представлен робототехническая платформа, для спортивно-технических соревнований мини-сумо:

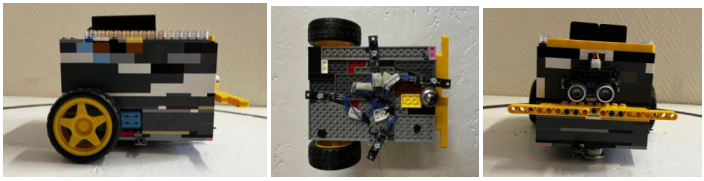


Рис. 1 Робототехническая платформа

Робот-сумо представляет собой компактную платформу весом 680г, размерами 18x17x13,5 см. Робот имеет низкий центр тяжести для повышения устойчивости и снижения риска опрокидывания при столкновении с противником. Робот оснащен двумя двигателями постоянного тока – «pla-1-90-steel», подключенных к микроконтроллеру через драйвер мотора – «MX1508». Каждый двигатель приводит в движение одно колесо, что позволяет роботу выполнять разворот на месте и маневрировать в ограниченном пространстве ринга.

Для повышения сцепления с поверхностью ринга используются специальные колеса с резиновым покрытием высокого коэффициента трения.

Сенсорная система:

1. Инфракрасные датчики линий – TCRT5000 (4шт) расположены по периметру нижней части робота и определяют границу ринга, предотвращая выезд за его пределы.
2. Ультразвуковой датчик - HS-SR04 направлен вперед, обеспечивает обнаружение противника на расстоянии до 55 см.

3. Инфракрасный датчик - GP2Y0A21YK0F дополняет ультразвуковой датчик для более точного определения положения противника на ринге.

Система управления:

Вычислительное ядро робота построено на базе микроконтроллер Arduino Nano v3, основанного на чипе ATmega328P.

Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 2, программная реализация алгоритма выполнена на языке C++ в среде Arduino IDE.

Структура алгоритма основана на шести основных состояниях: инициализация, проверка на нахождение внутри ринга, поиск противника, подготовка к атаке, атака, отступление от границы.

Основной алгоритм управления роботом-сумо построен по принципу циклического опроса датчиков и принятия решений на основе полученных данных. Блок-схема отражает ключевые этапы работы алгоритма:

1) Начало - точка входа в алгоритм, выполняемый непрерывно во время работы робота.

2) Проверка датчиков линии - анализ показаний инфракрасных датчиков, определяющих границу ринга.

3) Условное ветвление «На линии» - проверка, находится ли робот на границе ринга.

4) Движение в противоположную сторону от сработавшего датчика - маневр ухода от границы ринга для предотвращения дисквалификации.

5) Измерение расстояний - опрос ультразвуковых дальномеров HC-SR04 и ИК-датчиков Sharp для определения положения противника.

6) Условное ветвление «Расстояние <25 см» - проверка близости противника для выбора тактики.

7) Устремление на максимальной скорости в сторону противника - основной атакующий маневр при близком обнаружении противника.

8) Условное ветвление "Расстояние <55 см" - дополнительная проверка для средней дистанции.

9) Атака с плавным замедлением - тактика сближения с противником на средней дистанции.

10) Поиск противника (движение + поворот) - маневр для обнаружения противника, если он не в зоне действия датчиков.

11) Конец.

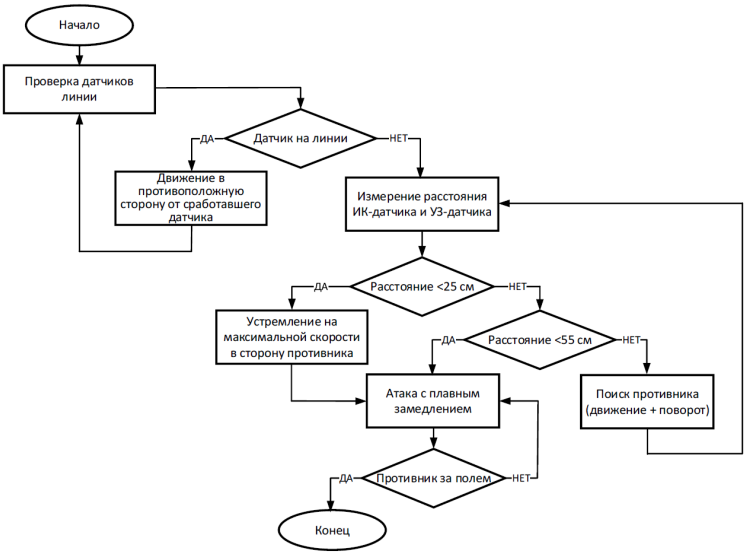


Рис. 2 Блок-схема алгоритма робототехнической платформы

Описание основных этапов алгоритма

1. Инициализация и калибровка:

Перед началом основного рабочего цикла, представленного на блок-схеме, робот проходит стадию инициализации, во время которой происходит:

- проверка работоспособности всех систем;
- калибровка датчиков линии и дальномеров;
- установка начальных параметров алгоритма.

Калибровка особенно важна для датчиков линии, так как они должны точно определять границу ринга в различных условиях освещения. Для этого робот использует адаптивные пороговые значения, которые настраиваются при запуске.

2. Контроль положения относительно границ ринга:

Проверка датчиков линии имеет наивысший приоритет в алгоритме и выполняется в начале каждого цикла. Это обеспечивает безопасность робота от выезда за пределы ринга и возможной дисквалификации.

Если один из датчиков линии обнаруживает границу ринга (черную линию на белом фоне), алгоритм немедленно прерывает любые текущие действия и инициирует маневр ухода:

- определяется, какой именно датчик сработал;
- вычисляется вектор движения, противоположный направлению к обнаруженной границе;
- робот выполняет маневр отхода от границы к центру ринга с корректировкой траектории.

3. Обнаружение и измерение дистанции до противника:

Если робот находится в безопасной зоне, выполняется измерение расстояний с помощью комбинации датчиков:

- ИК-датчики Sharp используются для точного определения близко расположенных объектов (эффективный диапазон 10-80 см);
- ультразвуковые дальномеры HC-SR04 обеспечивают более широкий диапазон обнаружения (до 400 см).

Система использует комбинированные показания с фильтрацией для снижения ошибок, а для повышения точности усредняет несколько измерений, исключая аномалии.

4. Стратегия атаки в зависимости от дистанции

Алгоритм использует несколько стратегий атаки, выбор между которыми осуществляется на основе измеренного расстояния до противника:

1) ближняя дистанция (до 25 см) – «Устремление на максимальной скорости в сторону противника»:

- оба двигателя работают на максимальной мощности;
- траектория корректируется для прямого столкновения с противником;
- цель: создать максимальное усилие для выталкивания противника.

2) средняя дистанция (25-55 см) – «Атака с плавным замедлением»:

- робот начинает движение на высокой скорости;
- по мере приближения к противнику скорость плавно снижается;
- цель: обеспечить точное позиционирование при контакте с противником и избежать рикошета.

3) Дальняя дистанция (более 55 см) – «Поиск противника"»:

- робот выполняет комбинацию движений и поворотов для сканирования ринга;
- применяется оптимизированный алгоритм поиска с учетом наиболее вероятного местоположения противника;
- цель: обнаружить противника и перейти к одной из атакующих стратегий.

Особенностью реализации алгоритма является его цикличность и параллельный контроль нескольких параметров:

- основной цикл выполняется с частотой до 100 Гц (в зависимости от загруженности процессора);
- в любой момент выполнения атакующих действий проверка датчиков линии может прервать текущий маневр;
- система постоянно отслеживает эффективность выбранной стратегии и вносит корректировки при необходимости.

Выводы

Разработанный алгоритм автономного управления роботом-сумо показывает эффективный подход к интеграции сенсорных данных и принятию решений в соревновательной робототехнике. В будущем планируется использовать более сложные методы машинного обучения для прогнозирования поведения противника и улучшения стратегий. Также предполагается расширить сенсорную систему, добавив машинное зрение для более точного определения положения и ориентации соперника.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мироновский Л. А., Слаев В. А. Алгоритмы оценивания результата трех измерений //Профессионал. – 2010.

2. BattleBots. Режим доступа: https://battlebots.com/rules (дата обращения: 18.05.2025)

Авторы: Кокунин Петр Анатольевич: кандидат технических наук, доцент кафедры физики перспективных технологий и материаловедения, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, город Казань, улица Салиха Сайдашева 12/3, 420101, телефон: +7 (917) 873-22-17, email: pkokunin@mail.ru

Хурматуллин Даниф Фанилевич: студент 4-го курса, группы 16-102 кафедры физики перспективных технологий и материаловедения, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, город Казань, улица Салиха Сайдашева 12/3, 420101, телефон: +7 (939) 3126170, email: danifkhurmatullin@gmail.com

Authors: Kokunin Petr Anatolevich: Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor of Department of Advanced Technologies Physics and Materials Science, Institute of Artificial Intelligence, Robotics and System Engineering, Kazan (Volga Region) Federal University, 420101, Russia, Kazan, 12/3 Saylikha Saidasheva street, phone: +7 (917) 873-22-17, email: pkokunin@mail.ru

Khurmatullin Danif Fanievich: 4th year student, group 16-102 of Department of Advanced Technologies Physics and Materials Science, Institute of Artificial Intelligence, Robotics and System Engineering, Kazan (Volga Region) Federal University, 420101, Russia, Kazan, 12/3 Saylikha Saidasheva street, phone: +7 (939) 3126170, email: danifkhurmatullin@gmail.com

УДК 621.396

Шабернев Глеб Владимирович, Чикрин Дмитрий Евгеньевич,
Галиуллин Искандер Гаязович

МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ ПРИБЛИЖЕНИЯ ЗАШУМЛЁННЫХ ДАННЫХ ПОВЕРХНОСТЬЮ ВТОРОГО ПОРЯДКА

В данной работе решается задача построения поверхности второго порядка, приближающая данное облако точек, затем полученная поверхность приводится к главным осям. Полученное преобразование главных осей переводит исходное облако точек к нормированному каноническому виду.

Ключевые слова: метод наименьших квадратов, поверхность второго порядка, собственное значение, собственный вектор.

Shabernev Gleb Vladimirovich, Chickrin Dmitry Evgenevich,
Galiullin Iskander Gayazovich

LEAST SQUARES FITTING OF NOISY DATA WITH A SECOND ORDER SURFACE

This paper deals with the problem of constructing a second order surface interpolating given data point set, then reducing the surface to principal axes. The principal axes transformation sends the given data point set to normalized canonical form.

Keywords: least squares fitting, second order surface, eigenvalue, eigenvector.

Введение

Различные типы приближений, аппроксимаций и интерполяций данных, полученных экспериментальным путём, широко используются при вычислениях и моделированиях во многих прикладных задачах различных дисциплин: физики, астрономии, геологии и инженерии. Одна из важнейших инженерных задач – навигационная задача и связанные с ней задачи о получении траекторных оценок. Для получения данных о положении объекта и его предполагаемой траектории используются инерциальные системы, состоящие из нескольких датчиков. Один из них – магнитометр, измеряющий интенсивность магнитного поля Земли.

Как правило, использование магнитометра без предварительной калибровки не представляется возможным – его данные подвергаются сильным искажениям и шумам [1]. В норме его показания представляют из себя координаты точек трёхмерного пространства, лежащие на сфере радиуса 1 с центром в начале координат. Некалиброванные данные магнитометра вместо сферы будут приближённо лежать на эллипсоиде, сдвинутом и повёрнутом относительно начала координат [2]. Задача состоит в отыскании его уравнения и приведения его обратно к сфере радиуса 1 с центром в начале координат.

Задача минимизации

Пусть дан набор из n точек $p_i = \{x_i, y_i, z_i\}, i = 1, \dots, n$. Требуется отыскать эллипсоид, наилучшим образом приближающий этот набор. Искомый эллипсоид является частным случаем поверхности второго порядка [3]. Общее уравнение поверхности второго порядка может быть приведено к виду

$$M(x,y,z) = x^2 + Ay^2 + Bz^2 + Cxy + Dxz + Eyz + Fx + Gy + Hz + I = 0$$
$$A, B, C, D, E, F, G, H, I \in \mathbb{R}$$

Следуя классическому методу наименьших квадратов [4], будем искать минимум суммы квадратов значений уравнения поверхности $M(x,y,z)$ в исходных точках $p_i = \{x_i, y_i, z_i\}$

$$\sum_{i=1}^{n} \big(M(x_i, y_i, z_i)\big)^2 \to \min \quad (1)$$

Имеем задачу о нахождении минимума функции нескольких переменных, для решения которой ищем частные производные по всем переменным и приравниваем их к нулю, получая таким образом систему

$$\frac{\partial}{\partial A}\sum_{i=1}^{n} \big(M(x_i, y_i, z_i)\big)^2$$
$$= \frac{\partial}{\partial B}\sum_{i=1}^{n} \big(M(x_i, y_i, z_i)\big)^2 = \frac{\partial}{\partial C}\sum_{i=1}^{n} \big(M(x_i, y_i, z_i)\big)^2$$
$$= \frac{\partial}{\partial D}\sum_{i=1}^{n} \big(M(x_i, y_i, z_i)\big)^2 = \frac{\partial}{\partial E}\sum_{i=1}^{n} \big(M(x_i, y_i, z_i)\big)^2$$
$$= \frac{\partial}{\partial F}\sum_{i=1}^{n} \big(M(x_i, y_i, z_i)\big)^2 = \frac{\partial}{\partial G}\sum_{i=1}^{n} \big(M(x_i, y_i, z_i)\big)^2$$
$$= \frac{\partial}{\partial H}\sum_{i=1}^{n} \big(M(x_i, y_i, z_i)\big)^2 = \frac{\partial}{\partial I}\sum_{i=1}^{n} \big(M(x_i, y_i, z_i)\big)^2 = 0$$

Полученная система является системой девяти линейных уравнений с девятью неизвестными, имеющая единственное решение, состоящее из коэффициентов $\{A, B, C, D, E, F, G, H, I\}$, таких что уравнение поверхности

$$M(x,y,z) = x^2 + Ay^2 + Bz^2 + Cxy + Dxz + Eyz + Fx + Gy + Hz + I = 0$$

с этими коэффициентами удовлетворяет условию (1). Полученное уравнение задаёт поверхность второго порядка, наилучшим образом приближающее заданный набор точек p_i.

Приведение к главным осям

Полученное общее уравнение поверхности второго порядка задаёт поверхность в произвольном положении в пространстве относительно начала координат. Для поворота и смещения поверхности в начало координат

применяется метод нахождения собственного базиса и матрицы преобразования относительно этого базиса [5]. Первым шагом избавляются от линейных компонентов уравнения, а именно переменных, входящих в уравнение в первых степенях $Fx + Gy + Hz$, для этого начало координат переносится в центр поверхности. Квадратичная форма поверхности q, содержащая коэффициенты при квадратах переменных, и вектор линейных коэффициентов l имеют вид:

$$q = \begin{pmatrix} 1 & C/2 & D/2 \\ C/2 & A & E/2 \\ D/2 & E & B \end{pmatrix}; \qquad l = \begin{pmatrix} F/2 \\ G/2 \\ H/2 \end{pmatrix}.$$

Координаты центра поверхности p_c находятся по формуле $p_c = -q^{-1}l$, сдвиг $x' = x - p_c$ переносит начало координат в центр p_c. Поверхность приводится к главным осям путём приведения квадратичной формы к диагональному виду, для этого используется собственное разложение матрицы [6]. Для некоторой матрицы A собственное разложение имеет вид $A = VDV^{-1}$, где D – диагональная матрица, содержащая собственные значения матрицы A, а V – ортогональная матрица, чьи столбцы являются собственными нормированными векторами матрицы A. Матрица V отвечает за преобразование системы координат следующим образом.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = V^T \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} + p_c, \tag{2}$$

где (x, y, z) – старые координаты, а (x', y', z') – новые. При подстановке полученных (x, y, z) в уравнение $M(x, y, z)$=0 новое уравнение $M'(x', y', z') = 0$ будет иметь вид

$$\lambda_1 x'^2 + \lambda_2 y'^2 + \lambda_3 z'^2 + d' = 0,$$

где λ_1, λ_2, λ_3 – собственные значения матрицы квадратичной формы q.

Для применения преобразования координат к исходным точкам $p_i = \{x_i, y_i, z_i\}$, разрешаем матричное уравнение (2) относительно (x', y', z'), имеем

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = V(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - p_c). \tag{3}$$

Рис. 1 демонстрирует приведение к главным осям эллипсоидной поверхности, где оранжевым выделены точки до приведения, а зелёным – после. Заметим, что приведённые точки лежат на эллипсоиде, тогда как конечная цель – сфера [8]. Чтобы перевести эллипсоид в сферу, выполняется последнее преобразование сжатия [9] соответствующих осей с помощью матрицы

$$D_\lambda = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2}/\sqrt{\lambda_1} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\lambda_3}/\sqrt{\lambda_1} \end{pmatrix}$$

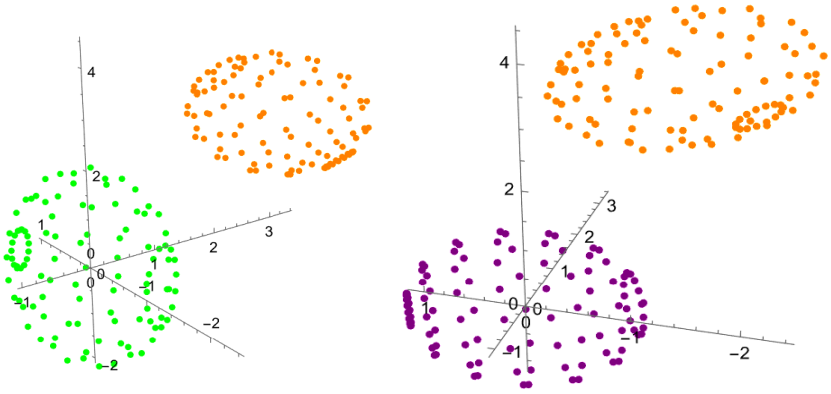


Рис. 1 Точки эллипсоидной поверхности до приведения к главным осям (оранжевый) и после без сжатия (зелёный) и со сжатием (фиолетовый)

Результат сжатия осей также показан на рис. 1, фиолетовые точки получаются из зелёных сжатием осей и располагаются на сфере с центром в начале координат радиуса 1. Таким образом, окончательное преобразование исходных точек запишется в виде:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2}/\sqrt{\lambda_1} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\lambda_3}/\sqrt{\lambda_1} \end{pmatrix} V\left(\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - p_c\right) \quad (4)$$

Как уже было сказано выше, исходные данные магнитометра не являются точками, лежащими на эллипсоиде, но могут быть приближены им [10], таким образом алгоритм калибровки следующий:

1) Данные точки $p_i = \{x_i, y_i, z_i\}, i = 1, \dots, n$ приблизить эллипсоидом $M(x, y, z) = 0$ методом наименьших квадратов.

2) Найти преобразование вида (4), переводящее $M(x, y, z) = 0$ к главным осям $M'(x', y', z') = 0$

3) Применить это преобразование к облаку исходных точек $p_i = \{x_i, y_i, z_i\}, i = 1, \dots, n$

Выводы

Рис. 2 демонстрирует работу алгоритма к некоторому набору исходных зашумлённых точек $p_i = \{x_i, y_i, z_i\}, i = 1, \dots, n$ (оранжевый), не лежащих на эллипсоиде, но приближённых им. Далее по эллипсоиду найдены

преобразования вида (4), которые затем применяются к исходным точкам p_i с результатом – фиолетовыми точками, расположенными близко к сфере.

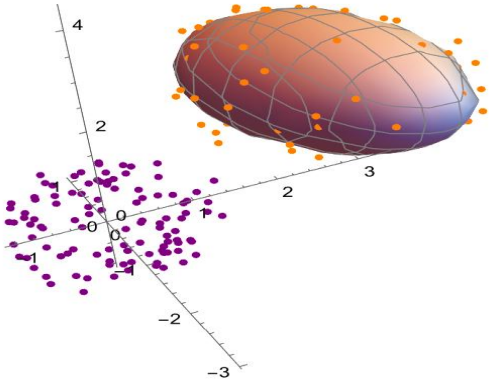


Рис. 2 Облако исходных зашумлённых данных (оранжевый), эллипсоид приближения и результат (фиолетовый)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горянина, К. И. Алгоритм повышения точности показаний трехосевых MEMS датчиков ориентации / К. И. Горянина, О. И. Катин, М. А. Вернези // Динамика технических систем "ДТС-2017" : сборник трудов XIII международной научно-технической конференции, Ростов-на-Дону, 13–15 сентября 2017 года / Министерство образования и науки Российской Федерации, Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2017. – С. 41-44. – EDN YSQVEE.

2. Malyugina A., Igudesman K., Chickrin D. Least-squares fitting of a three-dimensional ellipsoid to noisy data. // Applied Mathematical Sciences. - 2014. - №8. - С. 7409-7421.

3. Балюба, И. Г. Точечное исчисление: Учебно-методическое пособие / И. Г. Балюба, Е. В. Конопацкий, А. И. Бумага. – Макеевка: Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 2020. – 244 с. – EDN UVKHEE.

4. R. Halif, J. Flusser. Numerically stable direct least squares fitting of ellipses, // Proc. Sixth Int Conf. Computer Graphics and Visualization. – 1998. - №1, с. 125-132.

5. J. Yu, S. R. Kulkarni, H. V. Poor. Robust ellipse and spheroid fitting. // Pattern Recognition Letters. – 2012. - №33 (5). – С. 492-499

6. B. Bertoni. Multi-dimensional ellipsoidal fitting, Department of Physics, South Methodist University, Tech. Rep. SMU-HEP-1014, 2010

7. Емалетдинова, Л. Ю. Алгоритм коррекции данных трехосевого магнитометра / Л. Ю. Емалетдинова, А. В. Гайнутдинова, Т. Ю. Гайнутдинова // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2017. – № 1. – С. 128-134. – EDN YKMKBR.

8. Василюк, Н. Н. Калибровка коэффициентов линейной модели интегрального магнитометра за счет использования измерений трехосного гироскопа / Н. Н. Василюк // Гироскопия и навигация. – 2019. – Т. 27, № 1(104). – С. 107-126. – DOI 10.17285/0869-7035.2019.27.1.107-126. – EDN SNDKNH.

9. G. Taubin. Estimation of planar curves, surfaces and nonplanar space curves de ned by implicit equations with applications to edge and range image segmentation, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelli gence. 1991.

10. W. Feng, S.B. Liu, S.W. Liu, S. Yang. A calibration method of three-axis magnetic sensor based on ellipsoid fitting. J. Inf. Comput. Sci. 2013, 10, 1551-1558.

Авторы:

Шабернев Глеб Владимирович, ведущий инженер Сектора разработки встраиваемых систем НИЦ Центр превосходства «Специальная робототехника и искусственный интеллект» Института вычислительной математики и информационных технологий Казанского федерального университета, Россия, г. Казань, ул. С. Сайдашева, 12к3, 420021, телефон: +7 9063 200 970, email: gleb@it.kfu.ru

Чикрин Дмитрий Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, директор Института искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии Казанского федерального университета, Россия, г. Казань, улица С. Сайдашева 12к3, 420021, телефон: +7 917 27 27 100, email: dmitry.kfu@ya.ru

Галиуллин Искандер Гаязович: кандидат технических наук, заведующий сектором «интеллектуальные транспортные системы» лаборатории малой вычислительной техники Института вычислительной математики и информационных технологий Казанского Федерального Университета, Россия, г. Казань, ул. С. Сайдашева, 12к3, 420021, телефон: +7 9046 71 42 94, email: isgaluillin@email.com

Authors:

Shabernev Gleb Vladimirovich, lead engineer of Embedded Systems Development Sector, Center of Excellence «Special Robotics and Artificial Intelligence», Institute of Computational Mathematics and Information Technology, Kazan Federal University, 420021, Russia, Kazan, S. Saydasheva St., 12k3, phone: +7 9063 200 970, email: gleb@it.kfu.ru

Chickrin Dmitry Evgenevich, Doctor of Technical Sciences (Sc.D.), professor, Director of The Institute of Artificial Intelligence, Robotics and Systems Engeneering, Kazan Federal University, 420021, Russia, Kazan, S. Saydasheva St., 12k3, phone: +7 917 27 27 100, email: dmitry.kfu@ya.ru

Galiullin Iskander Gayazovich: Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Head of the Intelligent Transport Systems Sector, Laboratory of Small Computing Equipment, Institute of Computational Mathematics and Information Technology, Kazan Federal University, 420021, Russia, Kazan, S. Saydasheva St., 12k3, phone: +79046714294, email: isgaluillin@email.com

Научное издание

Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении

«КомТех-2025»

Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием

Отв. за выпуск Клевцов С.И.
Оригинал-макет подготовил Удод Е.В.

Подписано в печать 07.10.2025. Заказ № 10144.
Формат 60x84 1/16. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 28,6. Уч.-изд. л. 20,5. Тираж 20 экз.

Издательство Южного федерального университета

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел. (863) 243-41-66.