



БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ



ФАКУЛЬТЕТ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

МАТЕРИАЛЫ

62-й

НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
АСПИРАНТОВ, МАГИСТРАНТОВ И СТУДЕНТОВ БГУИР
ПО НАПРАВЛЕНИЮ

ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ



МИНСК 2026

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Материалы 62-й научной конференции аспирантов,
магистрантов и студентов БГУИР

по направлению

ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

(Республика Беларусь, г. Минск, 13–17 апреля 2026 года)

Научное электронное издание

Минск БГУИР 2026

ISBN 978-985-543-889-3

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2026

Редакционная коллегия:

П. В. Камлач – и. о. декана факультета компьютерного проектирования, кандидат технических наук, доцент;

Г. А. Пискун – заместитель декана факультета компьютерного проектирования, кандидат технических наук, доцент;

В. Ф. Алексеев – доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем, кандидат технических наук, доцент;

Т. В. Казак – заведующий кафедрой инженерной психологии и эргономики, доктор психологических наук, профессор;

В. Л. Ланин – профессор кафедры электронной техники и технологии, доктор технических наук, профессор;

А. Н. Петлицкий – директор государственного центра «Белмикрoанализ» научно-технического центра «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ», кандидат физико-математических наук

Опубликованы материалы докладов, представленных на 62-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР по направлению «Электронные системы и технологии». Авторами рассматриваются вопросы имитационного моделирования, численных методов, новых информационных технологий в образовании, радиоэлектронике, телекоммуникациях, вычислительных сетях, а также возможности современных систем автоматизированного проектирования.

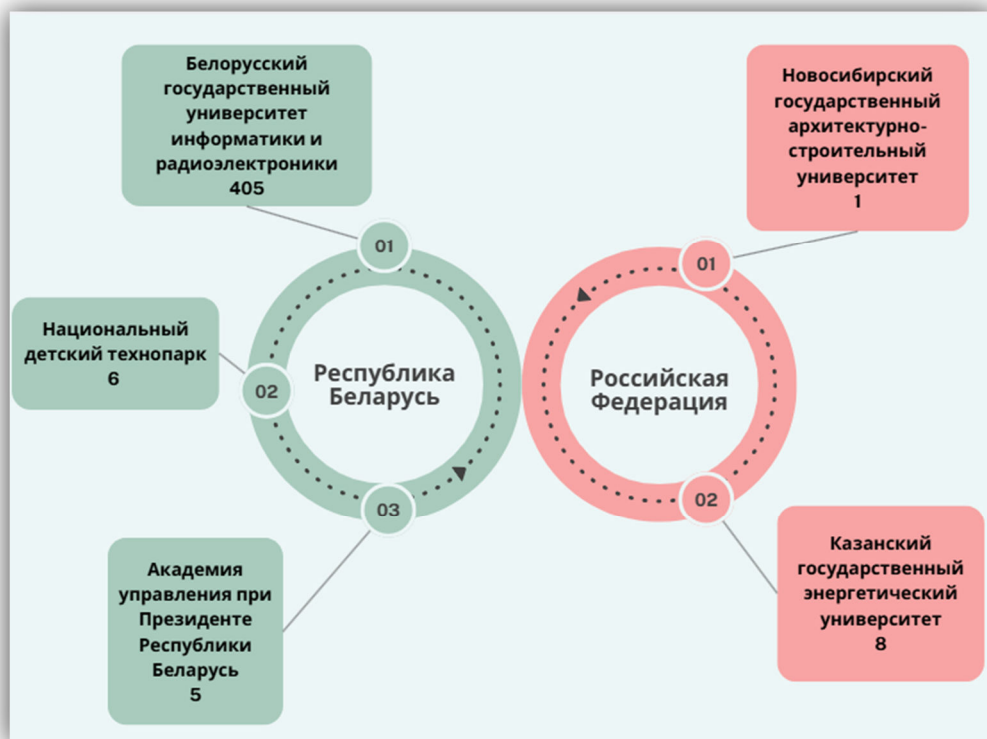
Материалы одобрены оргкомитетом и публикуются с учетом того, что авторская позиция и стилистические особенности публикаций полностью сохранены при соблюдении требований к оформлению.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области электронных систем и технологий, а также будет полезен научным и инженерно-техническим работникам, преподавателям, аспирантам, магистрантам и студентам технических вузов.

Системные требования: программа для просмотра PDF-файлов.

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2026

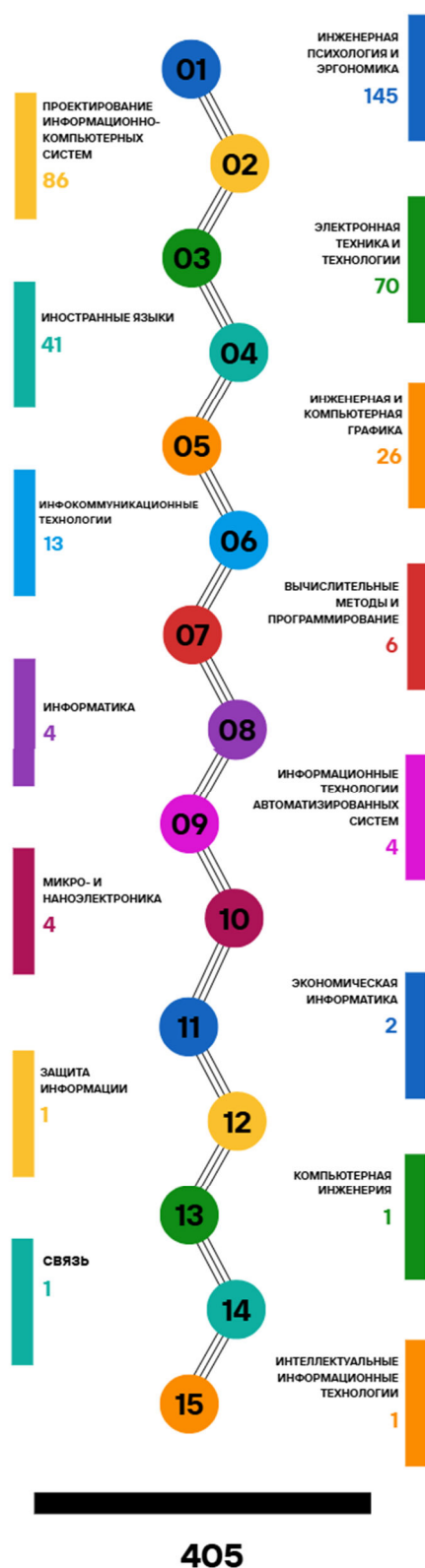
УЧРЕЖДЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ, ПРИНЯВШИЕ УЧАСТИЕ В КОНФЕРЕНЦИИ



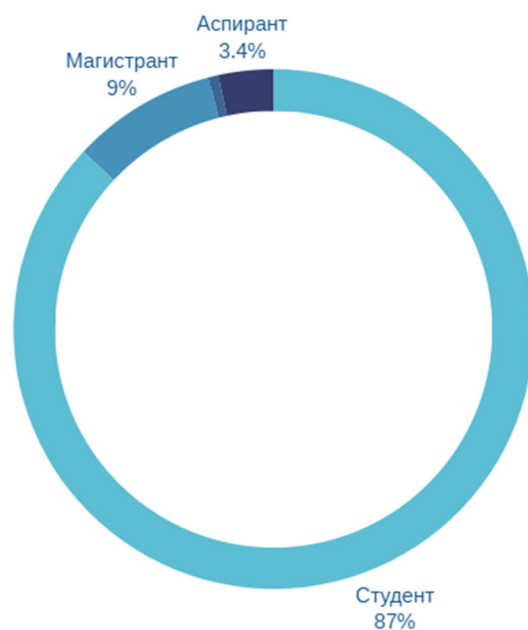
УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ (ПО СЕКЦИЯМ)



УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ ПО КАФЕДРАМ



УЧАСТНИКИ КОНФЕРЕНЦИИ



НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ



СЕКЦИЯ
«ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-КОМПЬЮТЕРНЫХ
СИСТЕМ»

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССИВНЫХ РАДИАТОРОВ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ МИКРОСХЕМ В РАЗНЫХ ТИПАХ КОРПУСОВ (QFP, BGA, QFN) <i>Яцкевич Я.С.</i>	49
СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ БИБЛИОТЕК PPL И TPL ДЛЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ <i>Русецкий А.Д.</i>	52
ПРИМЕНЕНИЕ РАСШИРЕННЫХ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ШАБЛОНОВ ДЛЯ УЧЕТА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ <i>Косарева Е.М., Кожевников Д.О.</i>	57
ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ПОИСКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ДЛЯ ТОРГОВЛИ НА МАРКЕТПЛЕЙСАХ <i>Крино О.С.</i>	60
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ БАНКОВСКОГО МОШЕННИЧЕСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНЫХ АЛГОРИТМОВ <i>Правоторова А.Ю.</i>	64
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИТОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В ИНФОРМАЦИОННО-КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ О РЮКЗАКЕ 0-1 <i>Марковец Р.С.</i>	67
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОГО СРАВНЕНИЯ СТРОК ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОНЛАЙН-ВИКТОРИН <i>Лямцев Г.К.</i>	70
ИНСТРУМЕНТЫ МОНИТОРИНГА ДИНАМИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ <i>Котько Е.Н.</i>	73

МОДЕЛИ И АРХИТЕКТУРЫ ДИНАМИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ <i>Котько Е.Н.</i>	77
СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СМАРТФОНОВ: АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ <i>Яромченко А.Г.</i>	81
ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ГЕНЕРИРОВАНИЯ СТАНДАРТНЫХ РАВНОМЕРНЫХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ <i>Алексеев С.А.</i>	85
ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВОГО СЕРВИСА «МОБИЛЬНЫЙ КАБИНЕТ АБОНЕНТА» ДЛЯ СФЕРЫ ЖКХ <i>Чехомов Е.Г.</i>	88
ROI АВТОМАТИЗАЦИИ: ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ <i>Кондратенко Е.В., Шии П.А.</i>	91
АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ДОСТУПНОСТИ КАК ЧАСТЬ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ <i>Концевая В.Д., Толстенков И.А.</i>	94
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОЧЕГО МЕСТА СПЕЦИАЛИСТА ОТДЕЛА СТАЖИРОВОК IT-КОМПАНИИ НА ОСНОВЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ФУНКЦИОНАЛА СИСТЕМ КЛАССА TMS <i>Косович П.В.</i>	97
АНАЛИЗ И ВЫБОР МЕТРИК ДЛЯ ОЦЕНКИ МОДЕЛЕЙ СЕМАНТИЧЕСКОГО СРАВНЕНИЯ: ОТ БАЗОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДО РАНГОВЫХ МЕТРИК <i>Крез К.С., Хлистунова К.В., Кузьмичкина Д.А.</i>	100
АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ДОСТУПНОСТЬ (ACCESSIBILITY) КАК ГАРАНТИРОВАТЬ УДОБСТВО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОДУКТА ДЛЯ ЛЮДЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ (НА БАЗЕ СТАНДАРТА WCAG) <i>Хлистунова К.В., Кузьмичкина Д.А.</i>	105

АНАЛИЗ СУБПАНЕЛИ АВИАЛАЙНЕРА <i>AIRBUS A320</i> НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ ИНЖЕНЕРНОЙ ПСИХОЛОГИИ <i>Маханьков Д.Д., Рудько В.В.</i>	108
АГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ REASONING-LLM ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЦИКЛА МАРКЕТИНГОВЫХ КАМПАНИЙ В ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ <i>Нуансенгси Д.В.</i>	112
СИНТЕТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ РЕКЛАМНЫХ МОДЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ: МЕТОДЫ ГЕНЕРАЦИИ, ПРИВАТНОСТЬ И ОГРАНИЧЕНИЯ <i>Нуансенгси Д.В.</i>	116
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ПО ИНФОРМАТИВНЫМ ПАРАМЕТРАМ МЕТОДОМ ПОРОГОВОЙ ЛОГИКИ <i>Романович С.А., Сурков В.Д., Тихонович А.В.</i>	119
<i>RSVP</i> В ОРГАНИЗАЦИИ КОРПОРАТИВНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ: ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАНИРОВАНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА <i>Цымбал Н.О.</i>	123
ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЛАЧНЫХ ХРАНИЛИЩ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ДЕДУПЛИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ <i>Вегера К.С.</i>	126
СРАВНЕНИЕ МЕТОДА ПОЛНОГО ПЕРЕБОРА СОСТОЯНИЙ И МЕТОДА СВЕРТКИ ПРИ ОЦЕНКЕ НАДЁЖНОСТИ РЕЗЕРВИРУЕМОГО УЗЛА СО СМЕШАННЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ <i>Зацепина М.И., Силенкова Д.С.</i>	129
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ И КОРРЕКЦИЯ МУЗЫКАЛЬНОГО ФОНА В ОБЩЕСТВЕННЫХ МЕСТАХ НА ОСНОВЕ ПСИХОАКУСТИЧЕСКИХ ДЕСКРИПТОРОВ И ИНСТРУМЕНТОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ <i>Зинковская Е.В.</i>	132

МЕТОДЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ АГРЕГАЦИИ ГРУППОВЫХ
ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МУЗЫКАЛЬНОГО
ПЛЕЙЛИСТА С УЧЕТОМ КОНТЕКСТНЫХ ФАКТОРОВ

Зинковская Е.В...... 134

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ *RWM* И *MPRT* В КОНТРОЛЛЕРАХ
ЗАРЯДА СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Куделич К.С...... 137

ФОРМИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ
НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОФИЛЯХ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ
РЕЙНОЛЬДСА

Бавбель Е.И...... 140

БАРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Бавбель Е.И...... 144

МОДЕЛИРОВАНИЯ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ
ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ МНОГОКАНАЛЬНОГО КОНТРОЛЛЕРА
УПРАВЛЕНИЯ СЕРВОМОТОРАМИ

Быстров М.Ю...... 147

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОБСТВЕННОЙ
ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ МОЩНОГО
POWER BANK ДЛЯ НОУТБУКА И ГАДЖЕТОВ В ПРОГРАММНЫХ
КОМПЛЕКСАХ SOLIDWORKS И COMSOL

Ходас В.А...... 152

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОЩНОГО HI-FI
УСИЛИТЕЛЯ ЗВУКА НА ОСНОВЕ МИКРОСХЕМЫ STK4231
В ГЕРМЕТИЧНОМ КОРПУСЕ

Коротков А.А...... 155

АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ
КОЛЕБАНИЙ ОТЛАДОЧНОЙ ПЛАТЫ С МИКРОКОНТРОЛЛЕРОМ
MG32F103RBT6

Кот Я.А...... 160

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО
РЕЖИМА В ГЕРМЕТИЧНОМ И ПЕРФОРИРОВАННОМ КОРПУСАХ
ДЛЯ ПЛАТЫ USB-UART АДАПТЕРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ
SOLIDWORKS

Мерзляков Д. П...... 164

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО
РЕЖИМА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ УПРАВЛЯЕМОГО СЕТЕВОГО
КОНЦЕНТРАТОРА В ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ SOLIDWORKS
И ANSYS

Насанович М.В...... 168

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ
ПРОЦЕССОВ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ВЫСОКОСТАБИЛЬНОГО
ТЕРМОСТАТИРОВАННОГО ГЕНЕРАТОРА С ЦИФРОВЫМ
УПРАВЛЕНИЕМ

Петкевич Д.В...... 173

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭЛЕКТРОННЫЙ МОДУЛЬ
ПРОГРАММИРУЕМОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА

Сенько Е.В...... 176

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ
В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ
МЕТОДОМ РУНГЕ-КУТТЫ 4-ГО ПОРЯДКА

Шибяев И. С...... 180

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ
ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Зубарь Д.С...... 183

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК
В СИСТЕМАХ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Ефремова А.Ю...... 186

СЕКЦИЯ
«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ»

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ДЫХАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ <i>Лужинский А.В.</i>	192
ПОРТАТИВНЫЙ АППАРАТ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ <i>Богданович В.В.</i>	196
АМПЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ ГЛЮКОМЕТР С МОБИЛЬНЫМ ПРИЛОЖЕНИЕМ <i>Немченко А.Д.</i>	199
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИИ-АССИСТЕНТОВ В СИСТЕМАХ ЖИДКОСТНОЙ ЦИТОЛОГИИ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЧТЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ <i>Печёнов М.С.</i>	202
ПОРТАТИВНЫЙ 3-Х КАНАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФ С WI-FI МОДУЛЕМ <i>Блажко У.С.</i>	205
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ <i>Степанюк Е. О.</i>	208
ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИКАЦИИ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА 3Д ПРИНТЕРЕ <i>Юшко Д.Е.</i>	210
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ ПРИ МОНТАЖЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ <i>Рахлин М.Е.</i>	215
АНАЛИЗ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЖЕВАТЕЛЬНЫХ МЫШЦ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ СТИМУЛЯЦИИ ИМПУЛЬСНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ <i>Круглик Е. В.</i>	218
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА ВОЗДУХА <i>Даревский Т.Д.</i>	221

МЕТОДИКА ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ЭМГ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЖЕВАТЕЛЬНОЙ
МЫШЦЫ

Швед И.А...... 224

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ НИЖНЕЙ ЧЕЛЮСТИ И ШЕЙНОГО
ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО
АНАЛИЗА

Горбачёв А. А. 226

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ
НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА
ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ

Ермакович М. А...... 228

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛОВ
В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ИНТЕРФЕЙСАХ

Жук Е.В...... 230

ТЕХНОЛОГИЯ СНИЖЕНИЯ ТОКОВ УТЕЧКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
AlGa_N/Ga_N ТРАНЗИСТОРОВ МЕТОДОМ КОМБИНИРОВАННОЙ
LPCVD-ПАССИВАЦИИ И ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Жук Е.В...... 233

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКООМНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК
ОКСИДА И НИТРИДА КРЕМНИЯ-ТИТАНА МЕТОДОМ
МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Александрович П. А., Бохань Л. 236

МОДЕЛЬ МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ ПРИ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ

Гладких А.П., Сакович М.С., Соловьев А.Я...... 239

МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БОЛЕВЫХ
СИНДРОМОВ

Стасенко М.И...... 243

ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМОЕ УСТРОЙСТВО УДАЛЁННОГО
МОНИТОРИНГА ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ
С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ АНАЛИЗОМ ПАРАМЕТРОВ

Бобровский П.Д...... 246

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА <i>Ордо С.В.</i>	251
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЫХАНИЯ <i>Жуковский Н.Е.</i>	255
ИНТЕНСИВНОСТЬ СУБГАРМОНИКИ $F_0/2$ В СПЕКТРЕ КАВИТАЦИОННОГО ШУМА ПРИ КОЛЛЕКТИВНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ПУЗЫРЬКОВ В КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ <i>Курлюк Е.А., Лебедь А.А., Бойдич А.В.</i>	259
ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ <i>BOSCH PROCESS</i> КАК ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА ТРАВЛЕНИЯ <i>Барковская К.Н.</i>	262
СИСТЕМА НЕЙРОСЕТЕВОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭКГ С ON-PREM ВЕБ-ШЛЮЗОМ <i>Ларченко Н.А.</i>	261
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ МОДУЛЬ КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ <i>Козинцова Е.А.</i>	264
ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФ НА БАЗЕ МОДУЛЯ ADS1298ECG-FE <i>Протасеня И. А.</i>	267
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭРОЗИИ ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ <i>Расчислова С.А.</i>	270
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПНЕВМОНИИ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ <i>Кошеленков А.Н.</i>	273
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ДИАГНОСТИКЕ ДИСФУНКЦИЙ ВНЧС <i>Засинец Ю.А., Хуцишвили В.А.</i>	275
РАЗРАБОТКА «БРЕЙН-СИСТЕМЫ» ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИГР <i>Савченко М.Е.</i>	278

ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ И ЕГО
МЕДИЦИНСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Левоненко Ю.И., Медюха А.Е. 281

ВЫРАЩИВАНИЯ АЛМАЗНЫХ ПОДЛОЖЕК МЕТОДОМ
ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Полубок А. В., Москаленко К. А. 284

ПРОБЛЕМЫ СБОРА ДАННЫХ О КАЧЕСТВЕ АТМОСФЕРНОГО
ВОЗДУХА И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Новиков Д.А...... 286

РАЗРАБОТКА ШПРИЦЕВОГО ВНУТРИВЕННОГО ИНФУЗИОННОГО
НАСОСА

Сенкевич М.В. 290

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
В ОБЛАСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРЕДСТЕРИЛИЗАЦИОННОЙ
ОЧИСТКИ

Важник М.А. 293

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТОГРАФИИ
В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Шульга А.А...... 295

УДАЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА В ПЛАЗМЕ СВЧ С ПЛАСТИН БОЛЬШИХ
ПЛОЩАДЕЙ

Масейкова Д.Д. 297

ОБЗОР МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Смольская Т.С., Друц Э.В. 300

ПСИХОДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ, ОБРАБОТКИ
РЕЗУЛЬТАТОВ И ОЦЕНКИ ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ЧЕЛОВЕКА

Гоман В.В. 304

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ВНЕПОЛОСНОГО ПОДАВЛЕНИЯ
КОМПАКТНЫХ ВХОДНЫХ ПОЛОСОВЫХ ФИЛЬТРОВ
ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ И IoT-УСТРОЙСТВ

Марченко Т.В. 307

ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА
И ТОПОЛОГИИ ЗЕМЛИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛОСОВОГО LC-
ФИЛЬТРА

Марченко Т.В. 311

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОБУЧАЮЩЕГО НАБОРА ДАННЫХ
ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ СТРУКТУР СРЕДНЕГО И ВНУТРЕННЕГО УХА
НА КТ-ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Смольская Т.С., Друц Э.В. 315

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА NFC В ИМПЛАНТИРУЕМЫХ
МЕДИЦИНСКИХ ДАТЧИКАХ

Сокольчик М. А. 318

ИНЪЕКЦИОННЫЕ НЕЙРО–НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ СЕТИ:
К МИНИМАЛЬНО ИНВАЗИВНЫМ МОЗГОВЫМ ИНТЕРФЕЙСАМ
ДЛЯ ТОЧНОЙ НЕЙРОМОДУЛЯЦИИ

Ахмед Сохайб А. Ф. 321

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОНОМНЫХ НОСИМЫХ БИОСЕНСОРНЫХ
СИСТЕМ С САМОПИТАНИЕМ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО МОНИТОРИНГА
СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ

Ахмед Сохайб А. Ф. 324

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВОЙ
ПАЯЛЬНОЙ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПАЯЛЬНИКА
ПРИ МОНТАЖЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Нестерович Е.А. 329

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ
НАРУШЕНИЯ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Карпинчик Г.А. 333

СИСТЕМА СКРИНИНГОВОЙ ДИАГНОСТИКИ
НЕЙРОДЕГЕНЕРАТИВНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
ГРАФИЧЕСКИХ ПАТТЕРНОВ

Близнюк В.Д. 336

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВТОРИЧНЫХ ИОННЫХ
ПУЧКОВ И ПОТЕНЦИАЛА ДИАФРАГМЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ТИТАНА

Перепечко Е.Ю. 339

THE EFFECT OF COLD PLASMA ON THE INHIBITION OF THE GENUS
STAPHYLOCOCCUS BACTERIA

Provlockaya D.V., Panfilenko E.D. 342

GSM-КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫМ
ТЕПЛОВЫМ ПУНКТОМ

Бурлыко А.И. 341

ТЕРМОРЕГУЛЯТОР ПРОГРАММИРУЕМЫЙ С ЖК-ДИСПЛЕЕМ

Селивоненко Ю.В. 344

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ
ФОТОРЕЗИСТА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

Коваленко И.А. 346

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
И ЕГО ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ

Тарногурская А.Д., Борисюк А.О. 349

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ
КРИСТАЛЛОВ

Навумчик П.А. 352

ИЗМЕРИТЕЛЬ ТОКА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА С ЦИФРОВЫМ
ИНТЕРФЕЙСОМ

Раткевич И.И. 356

ВЛИЯНИЕ ВИДА ВОЗБУЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА
НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В ОБЪЁМЕ
РЕЗОНАТОРА СВЧ-ПЛАЗМАТРОНА

Шавня Д.С. 359

АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ КАЛМАНА ДЛЯ ОЧИСТКИ СИГНАЛА
ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИЙ
ЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ахметзянов Г.Д. 364

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ИОННО-ЛУЧЕВОГО
ТРАВЛЕНИЯ КВАРЦА ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ УГЛА НАКЛОНА
ИОННОГО ПУЧКА

Ходяков И.В. 368

ВСТРАИВАЕМЫЙ МОДУЛЬ РАСШИРЕНИЯ USB <i>Логвинов Д.С.</i>	371
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДВУХСЛОЙНОГО ПРОСВЕТЛЯЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ Al_2O_3/MgF_2 НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ <i>Макарьцов И.О.</i>	374
НАНЕСЕНИЕ ДВУХСЛОЙНОГО ПРОСВЕТЛЯЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ Al_2O_3/MgF_2 МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРЕНИЯ С ИОННЫМ АССИСТИРОВАНИЕМ <i>Макарьцов И.О.</i>	378
ФОРМИРОВАНИЕ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ АЗОТОМ <i>Потылкин А.Н.</i>	382
ОКНО В НАНОМИР <i>Ляшко М.С., Гурина Т.Д.</i>	386
ВЛИЯНИЕ СОСТАВА РАБОЧЕГО ГАЗА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ <i>Курбако Е.Г.</i>	391
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИКОМПОЗИЦИОННЫХ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ <i>Ордо С.В.</i>	394
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЧ ПОЛЯ ВНУТРИ КОЛЬЦЕВОГО ВОЛНОВОДА <i>Барковская К.Н.</i>	397
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ НИКЕЛИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ АЛЮМИНИЕВЫХ КОРПУСОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ <i>Свирид Н.М.</i>	411
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ДЫХАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ <i>Коваленко А.В.</i>	415

СЕКЦИЯ
«ИНЖЕНЕРНАЯ ПСИХОЛОГИЯ И ЭРГОНОМИКА»

**СТУДЕНЧЕСКИЙ ЛИТЕРАТУРНЫЙ ФОРУМ И ЕГО
ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

<i>Билида Е.А.</i>	420
ELASTICSEARCH. ПЕРЕХОД К NOSQL РЕШЕНИЯМ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЭФФЕКТИВНОГО ПОИСКА В БОЛЬШИХ ДАННЫХ	
<i>Бабич А.С.</i>	423
ОНЛАЙН-ПЛАТФОРМА ДЛЯ ПОДБОРА И ПОКУПКИ КНИГ	
<i>Бычек Е.Н.</i>	426
ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА КОНЦЕПЦИИ ЛИЧНОСТНОЙ ПРОГРАММЫ ПО ПОВЫШЕНИЮ ПРИВЕРЖЕННОСТИ К ЗДОРОВОМУ ОБРАЗУ ЖИЗНИ	
<i>Долголев И.Э.</i>	429
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ РАЗДЕЛЬНОГО СБОРА ОТХОДОВ В МОСКОВСКОМ РАЙОНЕ	
<i>Фролов М.А., Кузьмич Д.С.</i>	432
ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРЫ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СОВМЕСТНЫХ ФОТОАЛЬБОМОВ	
<i>Глушко А.Ю.</i>	435
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СТРАХОВАНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ НА БАЗЕ SPRING FRAMEWORK	
<i>Говша Ю.В.</i>	438
ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ТЕСТИРОВАНИЯ И ОЦЕНКИ ПОЗНАВАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ И ЕЁ ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	
<i>Иванчик А.А.</i>	441

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СОТРУДНИКОВ И ОЦЕНКИ РИСКА ВЫГОРАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ	
<i>Изотова А.С.</i>	443
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ «КАЛЕНДАРЬ ВРАЧЕБНЫХ НАЗНАЧЕНИЙ»	
<i>Хоружик Е. В.</i>	446
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ «СЛУЖБА ДОСТАВКИ ЕДЫ» И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	
<i>Князева Е.Н.</i>	449
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ КООРДИНАЦИИ БЫТОВОЙ ВЗАИМОПОМОЩИ В РАМКАХ ЖИЛОГО КОМПЛЕКСА	
<i>Курбатский В.С.</i>	452
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НОРМОКОНТРОЛЯ СТУДЕНЧЕСКИХ РАБОТ В БГУИР И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	
<i>Курильчик А.В.</i>	455
МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ТУРИСТИЧЕСКИХ ПУТЕШЕСТВИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	
<i>Лагутенков П.В.</i>	458
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ	
<i>Лойко А.И.</i>	461
СИСТЕМА VR-МУЗЕЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ ГИДОМ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	
<i>Масленко В.А., Малико Е.В.</i>	464
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ГИБКИХ НАВЫКОВ РАБОТНИКОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА БАЗЕ ФРЕЙМВОРКОВ REACT, NEXT.JS	
<i>Муха Е.А.</i>	467

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПЕРСОНАЛИЗАЦИИ ЮВЕЛИРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Огиенко Н.Д. 470

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ОФОРМЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКАЗОВ В СФЕРЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Писаренко Я.Д. 473

ИНЕРЦИОННЫЙ СЕПАРАТОР ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Абдуллина А.А. 476

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЛИЧНЫМИ ФИНАНСАМИ С АНАЛИТИКОЙ РАСХОДОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ БЮДЖЕТА

Бакун А.А. 480

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Близнюк А.А. 483

ОСОБЕННОСТИ АДАПТАЦИИ КОГНИТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ СТУДЕНТА К ВНЕШНИМ ДИСТРАКТОРАМ В УСЛОВИЯХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Букишта С.А., Попов С.А. 486

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПОДБОРА И БРОНИРОВАНИЯ ЭКСКУРСИЙ И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Буяновская А.В. 489

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ УЧЕТА И АНАЛИЗА ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ

Чирич Е.Д. 491

ПРОГРАММНЫЙ ПРОДУКТ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕСЫЛКИ ПОЧТОВЫХ ОТПРАВЛЕНИЙ И ЗАЩИТЫ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Гоков Е.В. 495

ОБРАЗ ЖИЗНИ КАК ФАКТОР ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ И УЧЕБНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТУДЕНТОВ

Горбель А. А. 498

ОЦЕНКА ТРАНСПОРТНОЙ НАГРУЗКИ КАК ИСТОЧНИКА
ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА ПРИМЕРЕ
КЛЮЧЕВОЙ МАГИСТРАЛИ Г. МИНСКА

Ишееков А.М...... 501

ВЛИЯНИЕ КОРОТКИХ РЕГУЛЯРНЫХ ПЕРЕРЫВОВ
НА ПРОДУКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ
IT-СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Касперец Е. А., Бельский М. Д...... 504

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ
ЗНАНИЙ СОТРУДНИКОВ ДЕПАРТАМЕНТА ОХРАНЫ И ЕГО
ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Клещенко И.С. 506

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОДБОРА
КОМПЛЕКТУЮЩИХ АВТОМОБИЛЯ

Князева Е.С. 509

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПОДБОРА И АНАЛИЗА ТЕАТРАЛЬНЫХ
ПОСТАНОВОК

Кругликов П.А. 512

ВЕБ-ПЛАТФОРМА ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ И ОБСУЖДЕНИЯ
ПРОИЗВЕДЕНИЙ СОВРЕМЕННОЙ ХУДОЖСТВЕННОЙ
ЛИТЕРАТУРЫ И ЕЁ ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Любецкий А.Д...... 514

МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ МЕНТАЛЬНОГО
И ФИЗИЧЕСКОГО ЗДОРОВЬЯ СОВРЕМЕННОГО ОБЩЕСТВА

Макаров К.С...... 516

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ
РАДИАЦИОННОГО ФОНА НА ПРИМЕРЕ ГОРОДОВ РЕСПУБЛИКИ
БЕЛАРУСЬ

Муравьёв Д.А., Лакотко В.А. 519

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ТРЕНИРОВКИ ПАМЯТИ И ВНИМАНИЯ
С ФУНКЦИЕЙ АДАПТАЦИИ ИНТЕРФЕЙСА ПОД ОСОБЕННОСТИ
ВОСПРИЯТИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Павлова А.Д...... 522

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ
НА ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ ПРИ ПОМОЩИ RFID

Прокопенко Д.В. 525

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОНЛАЙН-ПЛОЩАДКИ
ДЛЯ ЧАСТНЫХ ОБЪЯВЛЕНИЙ И ЕЁ ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Пуренков Е.Ф. 528

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ДЕГРАДАЦИИ
ЗЕМЕЛЬ В РЕЗУЛЬТАТЕ РЕКРЕАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ НА ПРИМЕРЕ
ГОРОДСКОГО ПАРКА ИЛИ ЛЕСОПАРКА

Пушистова Е.С...... 530

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ МОНИТОРИНГА
ПАРАМЕТРОВ МИКРОКЛИМАТА В ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛИЦАХ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ВЕГЕТАЦИИ

Семенько Е.А...... 533

ДИНАМИКА РАСПРОСТРАНЕННОСТИ КУРЕНИЯ СРЕДИ
СТУДЕНЧЕСКОЙ МОЛОДЕЖИ

Шпак М.Е., Гладкевич А.А...... 535

ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ
ВДОЛЬ АВТОМАГИСТРАЛЕЙ Г. МИНСКА МЕТОДОМ
ВИЗУАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Шумилов А. А. 538

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ СРЕДЫ В VR
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ НАВЫКОВ УЧАЩИХСЯ

Страчинский Я.С., Ошкин С.Е. 541

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ «КИНОДНЕВНИК» И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Вальмус У.М...... 544

ПРИМЕНЕНИЕ NLP-МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ «ТОКСИЧНОГО»
ПОВЕДЕНИЯ В ЧАТАХ

Василевский В. В., Пущик Е. А. 547

СОЛНЕЧНЫЙ ТРЕКЕР С АВТОМАТИЧЕСКИМ НАВЕДЕНИЕМ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

Яблонская А.А., Помахо А.В...... 550

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ <i>Жарский Е.А.</i>	553
ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ВЕТЕРИНАРНОЙ КЛИНИКИ СО ВСТРОЕННЫМ ТОРГОВЫМ МОДУЛЕМ И ЕЕ ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ <i>Жданович А.Н.</i>	556
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ АБОНЕНТОВ ОПЕРАТОРА СВЯЗИ <i>Анисенко Т.А.</i>	559
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АРЕНДЫ КАРШЕРИНГА <i>Антонович Д.А.</i>	562
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОТЫ ШКОЛЫ ТАНЦЕВ И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ <i>Борейко А.А.</i>	565
ВЕБ-СЕРВИС ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОТЫ АУКЦИОНА ДЛЯ КУПЛИ-ПРОДАЖИ АВТОМОБИЛЕЙ ИЗ-ЗА РУБЕЖА <i>Борисов Н.В.</i>	568
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЛИЧНОСТНОГО РОСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНИК ТАЙМ-МЕНЕДЖМЕНТА И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ <i>Бужинский И.И.</i>	571
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЕБ-РЕСУРСА ОБЩЕСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ: АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ И РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ ДЛЯ САЙТА GREENCROSS.BY <i>Фролов М.А., Говор Г.Г.</i>	574
СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО ОБМЕНА И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ К КОРПОРАТИВНЫМ ДОКУМЕНТАМ <i>Гичан А.Р.</i>	577
ВЛИЯНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАДЖЕТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СТУДЕНТОВ <i>Канунникова В.В., Майданюк А.С.</i>	580

ДЕСКТОПНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЖАРНОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ ПОМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА И АНАЛИЗА РАБОТЫ ПОЖАРНЫХ
ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ

Лукашевич А.Д., Тукайло М.А...... 583

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ФИКСАЦИИ И АНАЛИЗА НАРУШЕНИЙ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОПАСНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ОБЪЕКТЕ

Медведюк А.А...... 586

ВЕБ-СЕРВИС ДЛЯ КУПЛИ И ПРОДАЖИ АВТО «АВТОТОЧКА» И ЕГО
ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Новиков К.А...... 589

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОВИЗИОННОГО
МОНИТОРИНГА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ОБЪЕКТА

Савеня П.В...... 591

ВИРТУАЛЬНАЯ РЕАЛЬНОСТЬ В ОБУЧЕНИИ ХИМИИ

Скворец И.С.; Заматай М.С. 594

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ
В АТМОСФЕРУ ОТ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ В МИНСКЕ

Захаренков И.Д. 597

ВЛИЯНИЕ ВЕБ-СЕРВИСОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПЛАНИРОВАНИЯ НА ПОДДЕРЖАНИЕ СОЦИАЛЬНЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ И ПРОФИЛАКТИКА СОЦИАЛЬНОЙ
ИЗОЛЯЦИИ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Асташко В.И...... 600

ВЛИЯНИЕ УДАЛЁННОЙ РАБОТЫ НА КАЧЕСТВО ЖИЗНИ

Иосько М.А., Савин Т.А...... 603

АГРОДРОНЫ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ: ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ВНЕСЕНИЯ ПЕСТИЦИДОВ И СНИЖЕНИЕ РИСКОВ

Подрябинкин З.Д., Джалилова Н.Р...... 606

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РУССКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
В ШКОЛЕ

Химорода В.С...... 609

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ТУРИСТИЧЕСКОГО АГЕНТСТВА И ЕЁ
ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Ефименко Р.Н. 611

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ КОНСПЕКТИРОВАНИЯ С АДАПТИВНОЙ
СИСТЕМОЙ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ПОВТОРЕНИЙ И ЕГО
ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Малахова К.В. 614

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
КАДРОВОЙ СЛУЖБЫ ПРЕДПРИЯТИЯ

Марецкий Н.Д. 617

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АДАПТАЦИИ ПЕРСОНАЛА
В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МЕНТОРСТВА

Островский Я.А. 619

РАЗРАБОТКА ТЕЛЕГРАМ-БОТА С ИНСТРУКЦИЕЙ ПО ОКАЗАНИЮ
ПЕРВОЙ ПОМОЩИ

Павлюченко Ю.М., Шатило З.А. 621

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ
ЮРИДИЧЕСКИМИ ДЕЛАМИ И ДОКУМЕНТАМИ

Петрожицкая В.А. 624

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ ДУБРАВ

Шаболда П.А., Воробей Е.И. 628

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ВЫГОДЫ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Шаболда П.А. 631

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ЗА СЧЕТ ЦИФРОВИЗАЦИИ КАНАЛОВ
СВЯЗИ МЕЖДУ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ И РЕМОНТНЫМ
ПЕРСОНАЛОМ

Шепелевский Я.Е. 634

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ НАВЫКОВ
В СФЕРЕ IT

Старовойтов П.А...... 636

ВЕБ-СЕРВИС МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ АКТИВОВ

Степанюк К. С...... 639

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА
ХАРАКТЕРИСТИК ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПК

Терешко М.В. 643

ИНЖЕНЕРНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ДИЗАЙНА
СИСТЕМЫ КАК ФАКТОР УСПЕШНОГО ВНЕДРЕНИЯ
АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В БИЗНЕС-СРЕДЕ

Третьяк М.В...... 646

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА
НАЙМА И БЕЗОПАСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ ПЕРСОНАЛА

Войтович Е.А. 649

ОЦЕНКА УРОВНЯ СВЕТОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В НОЧНОМ ГОРОДЕ

Бабинович А.С., Булавко К.И...... 652

ТРУДОВЫЕ ЦЕННОСТИ ПОКОЛЕНИЙ Y И Z: СОЗДАНИЕ
АДАПТИВНЫХ HR-СТРАТЕГИЙ

Гетманчук Д.Г., Кляус А.Б. 655

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННОГО АРХИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПЕРЕХОДА
К БЕЗБУМАЖНОМУ ХРАНЕНИЮ ИНФОРМАЦИИ

Герасимович А.Ю; Бобровская В.Е. 657

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
СТИМУЛАМИ В ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ
АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ОПЕРАТОРА

Ильясова М.С. 660

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПОДБОРА ТЬЮТОРОВ И ЕГО
ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Караваев М.И...... 664

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА УСЛОВИЙ ТРУДА, АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ НА ПРОИЗВОДСТВЕ <i>Колесник В. П.</i>	667
СИСТЕМА ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ОПОВЕЩЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАБОТ НА ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ОБЪЕКТЕ <i>Костюкевич М.Н.</i>	670
ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСВОЕНИЯ ОБУЧАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ <i>Ковалева К.В., Сикаченко Л.М.</i>	673
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ПО УПРАВЛЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТРУДОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ <i>Куканьков Е.Д.</i>	676
ВЛИЯНИЕ ЦВЕТОВОЙ СРЕДЫ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ НА ЭМОЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ВО ВРЕМЯ ОТКАЗА ОТ ВРЕДНЫХ ПРИВЫЧЕК <i>Маслова Ю.Ю.</i>	679
ИНТЕРАКТИВНАЯ VR-ИГРА «ЛЕСТНИЦА ПРАВ: ВОЗРАСТ ГРАЖДАНИНА ИМЕЕТ ЗНАЧЕНИЕ» <i>Почебут М. Д., Журавлевич К. А.</i>	682
ВЕБ И МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ОНЛАЙН-ПЛАТФОРМЫ ОБЪЯВЛЕНИЙ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ДАННЫХ <i>Раджабов О.М.</i>	684
МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ПОКУПКИ АВИАБИЛЕТОВ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ БЛОГОМ ДЛЯ ПУТЕШЕСТВЕННИКОВ И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ <i>Рябцев Н.В.</i>	687
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ РАБОТЫ РЕКРУТЕРОВ И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ <i>Селюк С.Н.</i>	689

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЯ
ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ВОЛОНТЕРСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ И ЕГО
ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Скрипов И.О...... 692

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ПО АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ
ПРЕБЫВАНИЯ СОТРУДНИКОВ НА РАБОЧЕМ МЕСТЕ
И НАЧИСЛЕНИЯ ЗАРАБОТНОЙ ПЛАТЫ

Соболь М.А...... 695

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ИНТЕРНЕТ-БАНКИНГА С СИСТЕМОЙ
ВИЗУАЛИЗАЦИИ И АНАЛИЗА ФИНАНСОВОЙ АКТИВНОСТИ
КЛИЕНТОВ И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Соколовский Д.И...... 697

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ АРЕНДОЙ ПОМЕЩЕНИЙ
ТОРГОВОГО ЦЕНТРА И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Тарасов В.О...... 700

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ
ФОРМИРОВАНИЯ, ЗАЩИТЫ И ПЕРЕДАЧИ НАЛОГОВОЙ
ОТЧЕТНОСТИ И ЭЛЕКТРОННЫХ СЧЕТ-ФАКТУР

Воронов Г.А...... 703

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ
ДЛЯ БРОНИРОВАНИЯ КОВОРКИНГОВ И РАБОЧИХ МЕСТ
В ЧАСТНОЙ КОМПАНИИ

Якименко Н.Д...... 705

КОНВЕЙЕР ОБРАБОТКИ ПОЗЫ И НОРМАЛИЗАЦИЯ КООРДИНАТ
В AR-ПРИЛОЖЕНИИ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ПРИМЕРКИ ОДЕЖДЫ

Заяц А.А. 709

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ПО СОЗДАНИЮ МАРКЕТИНГОВОЙ
СТРАТЕГИИ И РЕКЛАМЫ И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Жигало В.А. 712

ФЛАЖКОВЫЙ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
АКТИВАТОРА ХИМИЧЕСКОГО ОГНЕТУШИТЕЛЯ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Дулебенец Д.М. Ковалик Д.А. 714

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ РЕЕСТРОМ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ В АПТЕКЕ <i>Лисовский О. Ю.</i>	717
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ХУДОЖНИКОВ И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ <i>Ульянова Г. В.</i>	720
ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ОЦЕНКИ РЫНОЧНОЙ СТОИМОСТИ НЕДВИЖИМОСТИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ <i>Чепелевич В.О.</i>	722
ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕТИ АПТЕК <i>Догодькина В.С.</i>	725
ВЕБ-САЙТ ПРИХОДА ХРАМА СВЯТИТЕЛЯ КИРИЛЛА ТУРОВСКОГО В Г. ЖАБИНКА: ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА ДУХОВНОГО ЕДИНСТВА И СОХРАНЕНИЯ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ БЕЛОРУССКОЙ ПРАВОСЛАВНОЙ ЦЕРКВИ И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ <i>Филимонюк А.А.</i>	729
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕЛЕМЕТРИИ И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ <i>Герасимов К.Р.</i>	732
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ «ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫЙ ПОДБОР ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ КУРСОВ И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ» <i>Кишун Д.Д.</i>	735
ВЕБ-ПЛАТФОРМА ДЛЯ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ КОГНИТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ УСТАЛОСТИ И ЕЕ ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ <i>Замотаев А.С.</i>	738
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИСТОРИИ ВЕЛИКОЙ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ВОЙНЫ <i>Глушко А.А.</i>	741

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ И ПОДДЕРЖКИ
ПОЛЕЗНЫХ НАВЫКОВ И ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ И ЕЕ
ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Романов К.В. 743

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И КОНТРОЛЯ ЗАПАСОВ ОПАСНЫХ
ВЕЩЕСТВ И ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Шамрило И.Г. 745

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ «АГРЕГАТОР ОБЩЕСТВЕННЫХ
МЕРОПРИЯТИЙ» И ЕГО ЭРГОНОМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Трушко Р.С. 748

ОСОБЕННОСТИ ЭРГОНОМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ АСТРОНОМИИ

Вербовская Е.М. 751

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ ПРИМЕРОЧНОЙ ДЛЯ МАГАЗИНА
С АТТРИБУТИКОЙ МИНСКОГО АВТОМОБИЛЬНОГО ЗАВОДА

Заяц А.А. 754

СОЦИОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРИВЫЧКИ И ОСВЕДОМЛЁННОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ

Яковчук Г.В., Щиглинский И.К. 757

СЕКЦИЯ
«ИНЖЕНЕРНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА»

КЛАССИФИКАЦИЯ И ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ВОЗДУШНОМ ОХЛАЖДЕНИИ ВЫСОКОМОЩНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ <i>Живицкий И.А.</i>	761
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ И ЯЗЫКОВ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ ГРАФИЧЕСКИХ ВЕБ-ИНТЕРФЕЙСОВ <i>Нгуен Т.З.</i>	765
ИГРОВЫЕ МЕХАНИКИ В ИНТЕРФЕЙСЕ ЦИФРОВЫХ ПРОДУКТОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ МОТИВАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ <i>Попова Е.С.</i>	769
ИНТЕРФЕЙС КАК ИНСТРУМЕНТ УДЕРЖАНИЯ ВНИМАНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ МОТИВАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ <i>Петрачков В.Л.</i>	772
ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОЗДАНИИ <i>Яхья-заде А. С.</i>	775
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ DASSAULT SYSTEMES SOLIDWORKS ДЛЯ ИСЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ АВТОМОБИЛЯ <i>Худер Л.Д.</i>	778
АНАЛИЗ И СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ НЕИГРОВЫХ ПЕРСОНАЖЕЙ В ВИДЕОИГРАХ <i>Яхья-заде С.С.</i>	781
КОГНИТИВНЫЕ СТИЛИ УЧАЩИХСЯ СТАРШИХ КЛАССОВ И СТУДЕНТОВ И ИХ УЧЁТ В ДИЗАЙН-ВИЗУАЛИЗАЦИИ АБСТРАКТНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ КОНЦЕПЦИЙ <i>Сыс Е.Д.</i>	784
АЛГОРИТМ ПРЕДОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ СЛАБОТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ <i>Платонова В.А.</i>	788

СРАВНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ДЛЯ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНИМАЦИИ

Подворный В.М., Блажевич Е.И. 791

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО
ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТРЁХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ
В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

Прокопчик К.А. 794

ПРОЕКТ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА
СБОРКИ УЗЛА ИЗДЕЛИЯ В 3DS MAX

Филипова А. Д. 798

РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ ЧЕРТЕЖЕЙ ДЛЯ НЕЗРЯЧИХ ЛЮДЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШРИФТА БРАЙЛЯ

Ариукевич А.В. 801

ОБРАТНЫЙ ИНЖИНИРИНГ ПРОСТОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ:
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОТ ФИЗИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ДО 3D-МОДЕЛИ

Суконкин В.В., Островский В.А. 803

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛОВОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ
ДЛЯ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ЧАСТНОГО ДОМА

Зиангиров А. Ф. 806

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ
ТУРБИННОГО КОЛЕСА С ИЗОГНУТЫМИ ЛОПАСТЯМИ

Мугинов А.М., Мугинова А.И. 810

РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА
МУЛЬТИВИХРЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА
ДЛЯ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Прец М. А, Вдовина В.А. 813

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АБСОРБЦИОННОЙ
ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Зинурова К.И. 816

ИГРОВАЯ ИНДУСТРИЯ КАК ПОМОЩНИК В ИЗУЧЕНИИ
ИНЖЕНЕРНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ

Михаленко Е.В. 819

ПРОБЛЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИНЖЕНЕРНЫХ
МОДЕЛЕЙ

Шибает И. С...... 822

**СЕКЦИЯ
«ИНОСТРАННЫЕ ЯЗЫКИ»**

**DESIGN OF 2.4 – 2.5 GHz RECEIVER WITH AUTOMATIC GAIN
CONTROL SYSTEM**

Chertoritskii I.G. 826

**INFLUENCE OF PRETREATMENT METHODS ON THE FORMATION
OF THIN-FILM NICKEL ELECTRODES FOR CAPACITIVE SENSORS**

Panfilenko E.D., Provlockaya D.V. 831

**THE EFFECT OF COLD PLASMA ON THE INHIBITION OF THE GENUS
STAPHYLOCOCCUS BACTERIA**

Provlockaya D.V., Panfilenko E.D. 836

**СЕКЦИЯ
«ПЕРВЫЙ ШАГ В НАУКУ»**

МЕТОДИКА ТЕСТИРОВАНИЯ НА ПРОНИКНОВЕНИЕ ДЛЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ <i>Михайловский С.Г.</i>	841
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПРОТИВОДЫМНОЙ ЗАЩИТЫ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ <i>Прусенкова А.О.</i>	845
АРХИТЕКТУРА ПОСТРОЕНИЯ СЕТИ ИНТЕРНЕТ В КОНТЕКСТЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ <i>Ваишкевич В.В.</i>	847
КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ <i>Шацкий М.Г.</i>	849
СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ <i>Середа И.С.</i>	853
РАЗРАБОТКА ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА С ФУНКЦИЕЙ ДЕТЕКЦИИ КРИТИЧЕСКИХ ЗВУКОВ В ЗАДАННОМ ДИАПАЗОНЕ ДЕЦИБЕЛ И ЭКСТРЕННЫМ ОПОВЕЩЕНИЕМ НАСЕЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ МОБИЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА <i>Мишук В.Е.</i>	856
ВЕБ-СКРЕЙПИНГ И ЭТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СБОРА ИНФОРМАЦИИ <i>Гимпель К.А.</i>	859
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ ВЕБ-АРІ: POSTMAN/NEWMAN И КОД-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ФРЕЙМВОРКИ <i>Кривоносова М.А.</i>	861
МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ УЧЕБНЫМ КОНТЕНТОМ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ СЕРВИСЕ РЕШЕНИЯ УЧЕБНЫХ ЗАДАЧ <i>Намдаг Т. Ц.</i>	866

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РУЧНОГО ТЕСТИРОВАНИЯ
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ

Войнилович Н.Ю., Галяк И.П., Ефименко Д.Д...... 869

ВИЗУАЛЬНОЕ РЕГРЕССИОННОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ
ИНТЕРФЕЙСОВ БИЗНЕС-ПРИЛОЖЕНИЙ

Трубеко В.В., Девятовский Д.С...... 872

СЕМАНТИЧЕСКИЙ ПОИСК И ПОДБОР КНИГ С ПОМОЩЬЮ
ИНТЕГРИРОВАННОГО ИИ-АССИСТЕНТА

Коршов М.И. 874

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО
ГЕНЕРИРОВАНИЯ СТАНДАРТНЫХ РАВНОМЕРНЫХ
ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

Алексеев С.А...... 877

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ
ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ С МОДУЛЕМ ДЕТЕКЦИИ ОСТАВЛЕННЫХ
ВЕЩЕЙ, КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ В МЕСТАХ
МАССОВОГО ПРЕБЫВАНИЯ ЛЮДЕЙ

Стома А.Д...... 880

ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ АВТОМАТИЗАЦИИ
ТЕСТИРОВАНИЯ UX ДЛЯ БИЗНЕС-ПРИЛОЖЕНИЙ

Гугалев А.С...... 883

АВТОМАТИЗАЦИЯ СКЛАДСКОЙ ЛОГИСТИКИ НА ОСНОВЕ
ТЕХНОЛОГИИ RPA

Карлюк П.А. 886

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ АНАЛОГОВ
ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ БРСМ

Куприянова К.В...... 889

ВСТРОЕННЫЙ ИИ-АССИСТЕНТ В ТИКЕТ-СЕРВИСЕ: ПОВЫШЕНИЕ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ОБРАЩЕНИЙ И НАПРАВЛЕНИЯ
РАЗВИТИЯ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА

Михайловская М.С...... 892

РАЗРАБОТКА ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА С ФУНКЦИЕЙ ДЕТЕКЦИИ КРИТИЧЕСКИХ ЗВУКОВ В ЗАДАННОМ ДИАПАЗОНЕ ДЕЦИБЕЛ И ЭКСТРЕННЫМ ОПОВЕЩЕНИЕМ НАСЕЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ МОБИЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА <i>Мишук В.Е.</i>	895
МЕТОД РАСЧЕТА ОЖИДАЕМОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ <i>Силенкова Д.С., Зацепина М.И.</i>	898
РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ВЕБ-САЙТА <i>Отгонбаатар Е.</i>	901
ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ УСПЕШНОСТИ НОВЫХ ПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО ВЫБОРА <i>Папко К.А.</i>	904
ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ РАСЧЁТОВ СТИПЕНДИЙ СТУДЕНТАМ В УЧРЕЖДЕНИЯХ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ <i>Пташук К.А.</i>	908
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КОГНИТИВНОЙ НАГРУЗКИ ОПЕРАТОРА В ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМАХ <i>Рудько В.Н.</i>	911
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ PAGE OBJECT И SCREENPLAY ПАТТЕРНОВ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СЦЕНАРИЕВ В БИЗНЕС-ПРИЛОЖЕНИЯХ <i>Шипуль А.Р.</i>	915
МЕТОД ОЦЕНКИ ОЖИДАЕМОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИКЛАДНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ <i>Силенкова Д.С., Зацепина М.И.</i>	919
ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО РЕАЛИЗАЦИИ КЛИЕНТСКОГО СЕРВИСА АВТОМАТИЗАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С СЕРВИСНОЙ КОМПАНИЕЙ <i>Василевич П.М.</i>	922
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ В УПРАВЛЕНИИ КОМПЬЮТЕРОМ <i>Яцковец М.А., Завалей В.А.</i>	926

ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ И КОРРЕКЦИИ ПОСТИНСУЛЬТНОГО БОЛЕВОГО СИНДРОМА <i>Шумская Я.П., Кушнер А.А.</i>	928
ПОВЫШЕНИЕ ВОВЛЕЧЁННОСТИ И УДЕРЖАНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ <i>Мосендз А.В.</i>	932
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ И АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВВП РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ <i>Полонников А. Д.</i>	937
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВЕБ-ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С LLM-АГЕНТАМИ: ПАТТЕРНЫ, ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ <i>Иванов В.В.</i>	939
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИЧНОГО БЮДЖЕТА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ДОХОДОВ И ИНФЛЯЦИИ <i>Прескурел Я.Ю.</i>	942
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИНАНСОВЫХ РЕЗЕРВОВ И ПОДУШКА БЕЗОПАСНОСТИ: КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА РИСКА <i>Прескурел Я.Ю.</i>	945
ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО РЕАЛИЗАЦИИ РЕШЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕСТИЦИОННОЙ КРИПТОПЛАТФОРМОЙ <i>Приходько Н.Н.</i>	948
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ТУННЕЛЕЙ ВЕНТУРИ НА ПРИЖИМНУЮ СИЛУ БОЛИДА ФОРМУЛЫ 1 <i>Химич Ф.С.</i>	951
ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО РЕАЛИЗАЦИИ RPA-РЕШЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДОГОВОРАМИ <i>Кузнецов Е.В.</i>	953
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНОГО ДВОЙНОГО СЧЕТЧИКА ЭНЕРГИИ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ПОСТРОЕНИЯ ПРОФИЛЯ НАГРУЗКИ И СЕТЕВЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ <i>Маякин Г.О.</i>	956

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВОЙ ПАЯЛЬНОЙ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПАЯЛЬНИКА ПРИ МОНТАЖЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ <i>Нестерович Е.А.</i>	960
РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ АРЕНДЕ АВТОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО СРАВНЕНИЯ ФОТООТЧЁТОВ <i>Ничипорчик К.А.</i>	964
ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕГИСТРАТОРА ТЕМПЕРАТУРЫ С ИНТЕРФЕЙСОМ USB И ПРОГРАММНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ ДАННЫХ НА БАЗЕ AVRDUINO UNO R4 С ПОДДЕРЖКОЙ ETHERNET И POE <i>Сидорович М.В.</i>	967
ОБЗОР МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОСТРОЕНИЯ КОНЦЕНТРАТОРОВ И СИСТЕМ СВЯЗИ НА ИНТЕРФЕЙСАХ RS-422 И RS-485 <i>Трутнев Н. А.</i>	970
МИКРОКОНТРОЛЛЕРНЫЙ РЕВЕРСИВНЫЙ ЧАСТОТОМЕР С ГРАФИЧЕСКОЙ ИНДИКАЦИЕЙ И АППАРАТНЫМ ОПРЕДЕЛЕНИЕМ НАПРАВЛЕНИЯ СЧЁТА <i>Василевский П.А.</i>	973
АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ МЕТОДОМ УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СРЕДСТВАМИ MATLAB <i>Вильтовская А.Д.</i>	976
ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ В УПРАВЛЕНИИ КОМПЬЮТЕРОМ <i>Яцковец М.А., Завалей В.А.</i>	979
ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА СЕМАНТИЧЕСКОГО ПОИСКА ФИЛЬМОВ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭМБЕДДИНГОВ <i>Захарьев В.А. Тоган И.Д.</i>	981
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ: АРХИТЕКТУРА, МЕТОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ <i>Сергиевич А.А, Шабанович Р.А.</i>	984

ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЛАЧНЫХ ХРАНИЛИЩ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ДЕДУПЛИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ <i>Вегера К.С.</i>	987
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ РЕСУРСОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ДОМАШНИХ СИСТЕМАХ <i>Агапова В.О.</i>	990
ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА <i>Кухто В.С.</i>	995
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ТЕХНОЛОГИЯХ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ И ПРОИЗВОДСТВА RDF-ТОПЛИВА <i>Гурман В.А.</i>	998
ПРЕДИКТИВНАЯ АНАЛИТИКА В ПРЕДУПРЕЖДЕНИИ АВАРИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ <i>Калугина В.А.</i>	1001
ТРАНЗАКЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В СФЕРЕ ФИНАНСОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ <i>Кохан А.Д.</i>	1004
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДЕТЕКЦИИ И БАРЬЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ МИКРОПЛАСТИКА <i>Аксёнова А. А.</i>	1007
ФОТОНИКА – ЭЛЕКТРОНИКА БУДУЩЕГО <i>Коновалов Н.О., Богдевич К.С.</i>	1011
СВЧ-КОМПОНЕНТЫ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ <i>Куприянович О.А.</i>	1014
ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ <i>Николаева С.Р., Сидоренко В.В.</i>	1016
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ <i>Журавская Е.А., Гололобов Н.С.</i>	1018

ОТКРЫТИЯ ПРОШЛОГО НА СТРАЖЕ НАСТОЯЩЕГО.
КОНСТРУКЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ
МЕТАЛЛОИСКАТЕЛЕЙ

Буйневич Д.А., Языков С.К., Соловей А.В. 1020

МЕТОДИКА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ
ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК
ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Вдовина В.А. 1024

ЭВОЛЮЦИЯ РОБОТОТЕХНИКИ – ОТ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ
МОДЕЛЕЙ К АВТОНОМНОМУ АТРОПОМОРФНОМУ ИНТЕЛЛЕКТУ

Шухно А. В., Бурак Е. М. 1026

ИНЖЕНЕРНАЯ ГРАФИКА КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЯЗЫК: ОТ ИДЕИ
ДО ПРОТОТИПА

Ефимович В.В., Федосюк А.В. 1029

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ВОСПРИЯТИЯ ГРАФИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ПРАКТИКЕ

Швабо Д.В., Сорокин М.А. 1031

ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ЛИСТОВОЙ ДЕТАЛИ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ КОНСТРУКЦИИ С УЧЁТОМ
ИНСТРУМЕНТОВ AUTODESK INVENTOR

Суходолов И.А., Павлюченко З.А. 1034

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРАКТИВНЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАРКЕТИНГА

Духовская С.О., Василюк В.Ю. 1037

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИММЕРСИВНЫХ СИСТЕМ
В ИНДУСТРИИ И МЕДИЦИНЕ

Лешкович С.С., Красовская Д.Ю. 1040

ОБУЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ФИЗИКЕ МИРА
С ПОМОЩЬЮ WORLD MODELS

Минченко Д.Н. 1043

ЦИФРОВЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ ПРИ ОБУЧЕНИИ
СТУДЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНОГО ВУЗА АСПЕКТАМ СОХРАНЕНИЯ
ИСТОРИЧЕСКОЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

Тарасова А.В. 1046

USING VIDEOGAMES FOR MILITARY TRAINING

Antonovich.E. A., Efremov.A.Y. 1049

GENETIC ALGORITHMS: HOW COMPUTERS “EVOLVE”

Astrowski V.A. 1051

THE INFLUENCE OF COLOR SOLUTIONS ON USER BEHAVIOR
AND CHOICE IN THE DIGITAL ENVIRONMENT

Bobr K.D., Yanuts A.P. 1054

PLANETARY ENGINEERING: THE HUMANITY’S POTENTIAL
TO LIVE ON OTHER PLANETS

Bogdanovich K.D. 1057

AI IN CYBERSECURITY

Danilevich P.V. 1059

FUNCTIONING OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TERMS IN MODERN
ENGLISH

Dziazhynskaya P.V. 1061

THE PSYCHOLOGY OF COLOR ON WEBSITES: A COMPARATIVE
ANALYSIS OF BELARUSIAN AND AMERICAN WEBSITES

Dikovitskaya A.O. 1063

HYDROGEN FUEL: A WHOLE CYCLE – MINING, APPLICATION AND
POTENTIAL RISKS

Gerasimchik E.N., Proturo A.P. 1065

SOFT SKILLS AS A COMPETITIVE ADVANTAGE FOR TECH
SPECIALISTS IN THE ERA OF AI

Goncharko S.A. 1067

THE IMPACT OF AI ON THE ENVIRONMENT

Guranchik F.A. 1069

HOW RELIABLE ARE MODERN BIOMETRIC SYSTEMS?

Gurskaya A. S. 1071

COMPARATIVE ANALYSIS OF PROGRAMMING LANGUAGES
STUDIED AT BSUIR AND THEIR COMPLIANCE WITH MODERN
REQUIREMENTS OF THE IT MARKET

Holod I.V., Zhukovskaya P.V. 1074

GENERATIVE AI (DEEPSEEK) IN LEARNING FOREIGN LANGUAGES
AT A UNIVERSITY: OPPORTUNITIES AND LIMITATIONS

Jalilova L.R. 1077

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CYBERSECURITY

Kaplunova A. A. Lobatskaya E. S. 1079

WWII VISION IN SOME ENGLISH-SPEAKING COUNTRIES

Khursan I.R. 1081

THE IMPACT OF GENERATIVE CHATBOTS ON THE IT SUPPORT
AND HELPDESK LABOUR MARKET

Kolosovsky M.Y. 1083

PSYCHOLOGICAL DEPENDENCE OF STUDENTS ON ARTIFICIAL
INTELLIGENCE IN THE EDUCATIONAL PROCESS

Korshunova V.A. 1085

GAMIFYING ACADEMIC ROUTINE: THE IMPACT OF CONTINUOUS
ENGAGEMENT MECHANICS ON STUDENT MOTIVATION

Kudan T.A., Tereshkin A.Y. 1087

THE IMPLEMETNATION OF VIBE CODING IN SOFTWARE
ENGINEERING

Kungurtsev A.V. 1089

HOW CHATBOTS AND VOICE ASSISTANTS WORK

Kupriyanovich O. A. 1091

A TOOL FOR MONITORING RESOURCE USAGE AND ENERGY
CONSUMPTION OF SOFTWARE APPLICATIONS TO SUPPORT
GREEN OPTIMIZATION

Laptinsky V.I.; Volkolovsky I.A. 1094

ENGAGEMENT ENGINEERING: THE ARCHITECTURE
OF PSICHOLOGICAL DEPENDENCE IN DIGITAL SYSTEMS

Malakhotkina E. A., Chesnakova E. V. 1097

PROMPT ENGINEERING FOR IMPROVING FOREIGN LANGUAGE
SKILLS OF TECHNICAL UNIVERSITY STUDENTS

Markovets D.Y., Pashkevich D.A. 1099

QUANTUM COMPUTERS: PRINCIPLES OF OPERATION
AND PROSPECTS FOR APPLICATION

Melnikov I. M., Miatselitsa M. P...... 1101

LI-FI – WIRELESS DATA TRANSMISSION USING LIGHT

Mischenko U.A. 1103

FROM ALERTS TO ACTION: AI AGENTS IN MODERN SECURITY
OPERATIONS

Nasevich A.A. 1105

ENEMY OR COLLABORATOR? THE IMAGE OF AI AND NEW
TECHNOLOGIES IN ENGLISH-LANGUAGE ART JOURNALS

Petrenko D.A., Makaruk P.A...... 1107

THE PROBLEM OF USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN IT
INTERVIEWS

Pleskatsevich V.A. Panteleev N.A. 1109

APPLICATION OF GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE
IN INFLUENCER MARKETING FOR INNOVATIVE PROJECTS

Pocherney M. S., Kuzmenkov M. S. 1111

CHILDREN VS. ALGORITHMS: EVALUATING THE EFFECTIVENESS
OF GLOBAL DEEPPAKE AND CONTENT MODERATION POLICIES
IN 2026

Poltorak V.V., Chernyavskaya S.I...... 1113

VR & AR IN ENGINEERING EDUCATION

Poteshenko M.A...... 1116

VR-AUGMENTED CONTROL SYSTEMS FOR COLLABORATIVE
ROBOTS IN MANUFACTURING

Rusilevich D.Y., Zuev D.N...... 1118

NEUROCHIPS AND BRAIN-COMPUTER INTERFACES: CURRENT
STATE AND OPPORTUNITIES

Ruzhkov A.P., Konchatov S.A. 1120

LIVING ROBOTS: XENOBOTS AND ANTHROBOTS

Saharchuk D. S...... 1122

«CO-OWN» DIGITAL PLATFORM

Sergieievich N.V., Navoev J.E...... 1124

CYBERSECURITY ON YOUR SMARTPHONE: WHAT YOUR APPS
ARE HIDING

Sevrukov K.I. 1126

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF BSUIR’S INTERACTION
WITH IT COMPANIES IN THE CONTEXT OF THE DISTRIBUTION
AND EMPLOYMENT OF GRADUATES

Sharstsiuk R.A., Kravchuk N.A. 1128

THE HIDDEN COST OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE
IN PROGRAMMING

Shibaev I.S...... 1131

THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ETHICAL HACKING

Sorokin K.D...... 1133

FIGHTING MONEY LAUNDERING WITHOUT SHARING SECRETS:
PRACTICAL USE OF CONFIDENTIAL COMPUTING

Sosnovskiy T.I...... 1135

AI– GENERATED TECHNICAL DOCUMENTATION IN GLOBAL
ENGINEERING: THE NEW FRONTIER OF LANGUAGE, STANDARDS,
AND QUALITY ASSURENCE

Surganova S.P., Kushchynski M.D. 1137

THE IMPACT OF AI ON THE ENVIRONMENT

Tsando E.L. 1140

THE FUTURE OF MICRO – AND NANOELECTRONICS

Teslyonok A.V...... 1143

THE ROLE OF CRYPTOCURRENCIES AND BLOCKCHAIN
IN THE MODERN ECONOMY

Tyupko A.A. 1146

A REVOLUTION IN MEMORY SAFETY: A COMPARATIVE STUDY
OF RUST, GO, AND MODERN C++ WITH CONTEMPORARY MEMORY
PROTECTION MECHANISMS

Ustimchuk R. V., Shubaba M. I...... 1148

THE DEVELOPMENT OF A CRYPTOALGORITHM BASED
ON DOMESTIC STANDARDS

Vasilevsky I. P., Dobygin. M. D...... 1151

SELF-DRIVING CARS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON THE
ROAD

Yatsevich G. V. 1154

THE ERA OF «AGENTIC AI»: WHEN CHATBOTS STARTED DOING
THINGS

Yefimau M. I., Baulina I. P...... 1156

ENHANCING RETAIL OPERATIONS THROUGH COMPUTER VISION

Zhitnikova D.S., Zaitseva S.V...... 1158

THE «FILTER BUBBLE» EFFECT: HOW RECOMMENDATION
ALGORITHMS SHAPE OUR WORLDVIEW AND LIMIT SERENDIPITY

Zinkovsky A.V...... 1160

THE INFLUENCE OF NEURAL NETWORKS ON THE CURRENT JOB
MARKET

Solovey A.V...... 1170

**СЕКЦИЯ
«ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-КОМПЬЮТЕРНЫХ
СИСТЕМ»**

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАССИВНЫХ РАДИАТОРОВ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ МИКРОСХЕМ В РАЗНЫХ ТИПАХ КОРПУСОВ (QFP, BGA, QFN)

Яцкевич Я.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Пискун Г.А. – к. т. н, доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Проведено сравнение эффективности установки пассивных радиаторов на цифровые микросхемы в трёх различных типах корпусов: QFP, QFN и BGA. На примере микроконтроллеров семейства MSP430 компании Texas Instruments, имеющих идентичную функциональность, но разное конструктивное исполнение, выполнен тепловой расчёт максимально допустимой рассеиваемой мощности. Используются паспортные значения тепловых сопротивлений «кристалл–среда» (θ_{ja}) и «кристалл–корпус» (θ_{jc}), а также рассмотрены три варианта пассивных радиаторов с тепловым сопротивлением 15, 30 и 50 °C/Вт. Установлено, что корпус QFN демонстрирует наилучшие показатели пассивного охлаждения без радиатора благодаря наличию нижней тепловой подушки, однако установка радиатора на него нецелесообразна..

Ключевые слова: пассивный радиатор, тепловое сопротивление, корпус QFP, корпус QFN, корпус BGA, рассеиваемая мощность, охлаждение микросхем, тепловой режим.

Введение. Современная цифровая электроника характеризуется непрерывным увеличением производительности и функциональной плотности микросхем при одновременном уменьшении их геометрических размеров. Микроконтроллеры, логические чипы и процессоры, упакованные в корпуса типов QFP, QFN и BGA, выделяют значительное количество тепла в процессе работы. Превышение максимально допустимой температуры кристалла (T_{jmax}) ведет к деградации характеристик, снижению надежности и выходу устройства из строя. Эффективность отвода тепла определяется тепловым сопротивлением «кристалл–окружающая среда» (θ_{ja}), которое сильно зависит от типа корпуса и условий охлаждения. Дополнительным важным параметром является тепловое сопротивление «кристалл–корпус» (θ_{jc}), которое описывает эффективность передачи тепла от кристалла к верхней поверхности корпуса – именно туда впоследствии устанавливается радиатор. Традиционным методом улучшения теплоотвода является установка пассивных радиаторов, однако, в силу конструктивных особенностей корпусов, прирост допустимой рассеиваемой мощности от установки одного и того же радиатора может кардинально различаться.

Различия корпусов QFP, QFN и BGA. В электронике широко используются три основных типа корпусов, расположенные на рисунке 1.

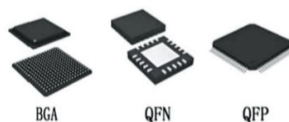


Рисунок 1 – Типы корпусов

QFP (Quad Flat Package) – корпус с выводами по четырём сторонам. Тепло от кристалла передаётся через металлический подложку и выводы на печатную плату, а также через поверхность корпуса в воздух.

QFN (Quad Flat No-leads) – безвыводной корпус с тепловой подушкой (exposed pad) на нижней стороне. Эта подушка припаивается непосредственно к медному полигону на плате, создавая очень эффективный путь отвода тепла.

BGA (Ball Grid Array) – корпус с шариковыми выводами, расположенными матрицей. Тепло проходит через подложку и множество шариков припоя в плату.

Расчёт. Для исследования выбраны три микроконтроллера семейства MSP430 (Texas Instruments), идентичные по функциональности [1, 2]. Для данной микросхемы, во всех исследуемых корпусах, представлены тепловые параметры, в таблице 1.

Таблица 1 – Тепловые параметры выбранных микросхем

Параметр	Обозначение	QFP	QFN	BGA
Тип корпуса		LQFP-48	QFN-40	BGA (ZQE)
Тепловое сопротивление кристалл–среда	θ_{ja} (°C/Вт)	67,6	31,6	55,5
Тепловое сопротивление кристалл–корпус	θ_{jc} (°C/Вт)	24,0	24,1	21,2
Максимальная температура кристалла	T_{jmax} (°C)	85	85	85
Температура окружающей среды	T_a (°C)	25	25	25
Температурный перепад	$\Delta T = T_{jmax} - T_a$	60	60	60

Для расчёта максимальной мощности, которую можно рассеять без превышения, использовалась следующая формула:

$$P_{max} = \frac{T_{jmax} - T_a}{\theta_{ja}} \quad (1)$$

При установке пассивного радиатора тепловая схема замещения имеет вид:

$$\theta_{ja(rad)} = \theta_{jc} + \theta_{cs} + \theta_{sa} \quad (2)$$

где θ_{sa} – тепловое сопротивление радиатора (15, 30 или 50°C/Вт).

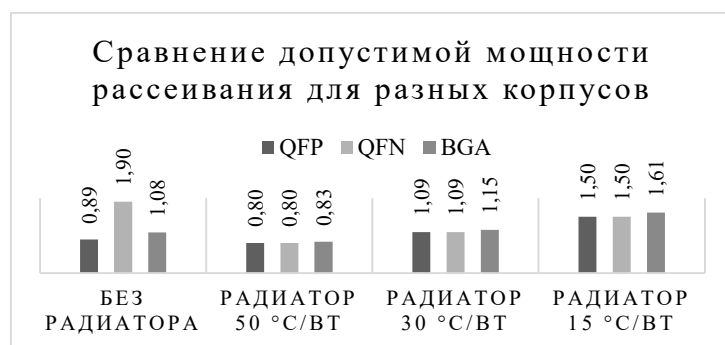


Рисунок 2 – Сравнение допустимой мощности рассеивания для разных корпусов

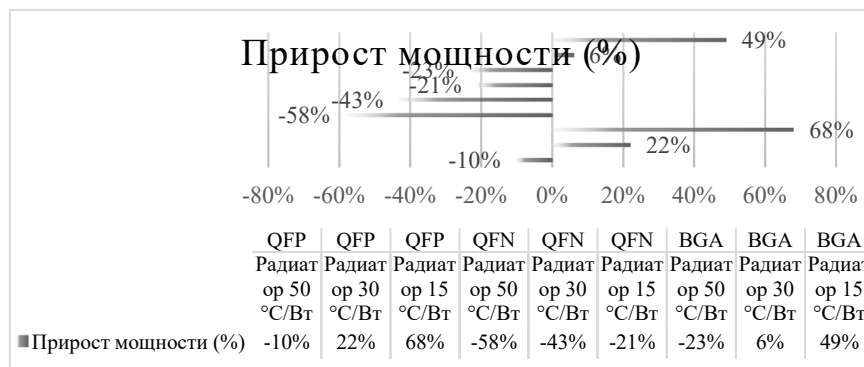


Рисунок 3 – Относительный прирост мощности при использовании радиатора

Заключение. На основе расчётов по реальным данным для микросхем в корпусах QFP, QFN и BGA установлено, что эффективность пассивного радиатора существенно зависит от конструкции корпуса. QFN обеспечивает наилучшее пассивное охлаждение без радиатора

благодаря нижней тепловой подушке, а установка радиатора для него нецелесообразна, поскольку снижает допустимую мощность на 21%. Наибольший абсолютный прирост от радиатора демонстрирует BGA: мощность увеличивается с 1,08 до 1,61 Вт (+49%) за счёт низкого внутреннего теплового сопротивления и слабого отвода тепла через шарики припоя. QFP показывает максимальный относительный прирост (+68%), однако его итоговая мощность остаётся ниже QFN без радиатора. Установлено также, что радиаторы с высоким тепловым сопротивлением ухудшают охлаждение для всех корпусов. Таким образом, наибольшую выгоду от пассивного радиатора получает BGA, тогда как QFN в радиаторе не нуждается, а QFP занимает промежуточное положение.

Список литературы

1. Texas Instruments. MSP430F51x1, MSP430F51x2 Mixed Signal Microcontroller Datasheet (SLAS619R).
2. Texas Instruments. MSP430FG461x Mixed Signal Microcontroller Datasheet (SLAS508K).
3. JEDEC Standard. JESD51-7: High Effective Thermal Conductivity Test Board for Leaded Surface Mount Packages. JEDEC Solid State Technology Association.
4. JEDEC Standard. JESD51-2a: Integrated Circuits Thermal Test Method Environmental Conditions – Natural Convection (Still Air). JEDEC Solid State Technology Association.

UDC 621.396.69: 536.24: 621.382-181.4

COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF PASSIVE HEAT SINKS FOR DIGITAL INTEGRATED CIRCUITS IN DIFFERENT PACKAGE TYPES (QFP, BGA, QFN)

Yatskevich Y.S.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Republic of Belarus*

*Piskun G.A. – Cand. of Sci., Associate Professor, associate professor of the Department of Design
of Electronic Computers*

Annotation. A comparison of the efficiency of installing passive heat sinks on digital integrated circuits in three different package types (QFP, QFN, and BGA) was carried out. Based on the example of MSP430 family microcontrollers from Texas Instruments, which have identical functionality but different package designs, a thermal analysis of the maximum allowable power dissipation was performed. The datasheet values of junction-to-ambient (θ_{ja}) and junction-to-case (θ_{jc}) thermal resistances were used, and three variants of passive heat sinks with thermal resistances of 15, 30, and 50 °C/W were considered. It was found that the QFN package demonstrates the best passive cooling performance without a heat sink due to the presence of an exposed thermal pad; however, attaching a heat sink to it is impractical.

Keywords: passive heat sink, thermal resistance, QFP package, QFN package, BGA package, power dissipation, integrated circuit cooling, thermal performance.

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ БИБЛИОТЕК PPL И TPL ДЛЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Русецкий А.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Логинова И.П. – к. т. н, доцент кафедры ЭИ

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ эффективности двух библиотек параллельного программирования - Parallel Patterns Library (PPL) для C++ и Task Parallel Library (TPL) для C#/NET - при решении систем линейных алгебраических уравнений. Исследование включает тестирование на системах размерностью 500×500 , 1000×1000 и 1500×1500 с использованием метода Гаусса, метода Гаусса-Жордана и метода Якоби.

Ключевые слова. Параллельные вычисления, системы линейных уравнений, метод Гаусса, PPL, TPL, сравнительный анализ производительности, масштабируемость алгоритмов, многопоточное программирование.

Введение. Развитие многопроцессорных вычислительных систем и многоядерных процессоров обусловило необходимость разработки эффективных параллельных алгоритмов для решения задач вычислительной математики. В контексте решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которые являются фундаментальной проблемой в научных вычислениях, инженерном анализе и машинном обучении, параллелизация представляет особый интерес ввиду высокой вычислительной сложности традиционных алгоритмов.

Современные технологии параллельного программирования предлагают различные подходы к реализации параллельных вычислений. В экосистеме Microsoft разработчикам доступны две ключевые технологии: Parallel Patterns Library (PPL) для C++ и Task Parallel Library (TPL) для C#/NET. Несмотря на схожие концептуальные основы, эти библиотеки существенно различаются по своей архитектуре, уровню абстракции и механизмам управления потоками, что может приводить к различиям в производительности при решении однотипных вычислительных задач.

Основная часть. В настоящей статье проводится сравнительный анализ эффективности PPL и TPL на примере реализации параллельных алгоритмов решения СЛАУ больших размерностей (500×500 , 1000×1000 и 1500×1500). Основное внимание уделяется исследованию масштабируемости алгоритмов при различном количестве вычислительных потоков (1, 2, 4, 8, 12), анализу ускорения вычислений и оценке эффективности использования вычислительных ресурсов.

Для обеспечения корректности сравнения были разработаны идентичные алгоритмические реализации метода Гаусса с выбором главного элемента и методом Якоби на обеих платформах [1]. Алгоритмы включают как последовательные, так и параллельные версии с использованием технологии многопоточных вычислений, предоставляемых соответствующими библиотеками.

Перед тем, как подробно приступить к исследованию, рассмотрим по отдельности каждую из библиотек: PPL и TPL.

Parallel Patterns Library (PPL) для C++. Parallel Patterns Library (PPL) – это высокоуровневая библиотека параллельного программирования, разработанная Microsoft для языка C++ и интегрированная в среду разработки Visual Studio. PPL предоставляет модель параллелизма, основанную на задачах (task-based), и поддерживает различные параллельные шаблоны для упрощения разработки многопоточных приложений [2].

Архитектурные особенности:

1 *Интеграция с C++ Standard Library*: PPL тесно интегрирована со стандартной библиотекой C++ и использует идиомы современного C++ (лямбда-выражения, шаблоны).

2 *Модель выполнения на основе задач*: основная абстракция – задача (task), которая представляет собой единицу работы, планируемую для выполнения в пуле потоков.

3 *Автоматическое управление потоками*: библиотека автоматически управляет созданием и уничтожением потоков через внутренний планировщик задач.

4 *Поддержка различных параллельных шаблонов*:

- parallel_for – параллельное выполнение циклов;
- parallel_for_each – параллельная обработка контейнеров;
- parallel_invoke – параллельное выполнение нескольких функций;
- task_group – группировка связанных задач.

Task Parallel Library (TPL) для C#/.NET. Task Parallel Library (TPL) – это набор компонентов .NET Framework и .NET Core, предоставляющих модели параллелизма и распараллеливания для языков семейства .NET. TPL абстрагирует низкоуровневые детали управления потоками, позволяя разработчикам сосредоточиться на логике приложения [3].

Архитектурные особенности:

1 *Интеграция с языком C#*: глубокая интеграция с языковыми конструкциями C#, включая ключевые слова async/await и LINQ.

2 *Иерархия абстракций*:

- Task – базовая единица асинхронной работы;
- Parallel – высокоуровневые параллельные конструкции;
- PLINQ – параллельные LINQ-запросы.

3 *Work-stealing алгоритмы*: использует расширенные алгоритмы кражи работы для балансировки нагрузки между потоками.

4 *Поддержка отмены и продолжений*: встроенные механизмы для отмены задач и определения зависимостей между ними.

Сравнение эффективности вычислений библиотек. Для сравнения эффективности параллельных вычислений потребуется единый набор входных данных – коэффициентов для систем линейных алгебраических уравнений. Для этого на языке C++ была написана программа, генерирующая матрицу случайных коэффициентов и вектор правых частей уравнений для СЛАУ размерностями 500×500, 1000×1000 и 1500×1500. Файлы с этими параметрами в последующем считываются и обрабатываются двумя программами, использующими методы библиотек PPL и TPL для параллельных вычислений [4]. В ходе сравнения эффективности параллельных вычислений этих библиотек для решения СЛАУ был использован ПК с конкретными характеристиками (таблица 1).

Таблица 1 – Технические характеристики ПК

Операционная система	Windows 10.0.19045
Версия C++	14
Версия .Net C#	5.0.201
Размер ОЗУ	16 ГБ
CPU	11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-1135G7 @2.40GHz
Количество ядер	4
Количество логических процессоров	8

Для решения СЛАУ каждая из программ с библиотеками PPL и TPL использует одинаковые математические методы и конфигурации потоков:

1 Последовательное решение СЛАУ методом Гаусса [5].

Метод состоит из прямого и обратного ходов. Прямой ход заключается в сведении расширенной матрицы системы уравнений к треугольному виду путем применения эквивалентных преобразований.

Обратный ход заключается в вычислении суммы $a[i][j]*x[j]$ для каждой из n строк, начиная с последней. При этом обрабатываются j только большие чем i (элементы выше главной диагонали). Асимптотическая сложность такого алгоритма – $O(n^2)$.

Таким образом, распараллеливать целесообразно только прямой ход. Даже если параллельно выполнять вычисления обратного хода с нулевыми издержками (на создание потоков и синхронизацию), например, на 4 ядрах – то теоретическое ускорение составит 0,4%. Для эффективного распараллеливания прямого хода, достаточно использовать в нем параллельную функцию триангуляции.

2 Параллельное решение СЛАУ методом Гаусса-Жордана [6] в конфигурациях на 1, 2, 4, 8 и 12 потоков.

Метод Гаусса – Жордана является модификацией метода Гаусса. В отличие от метода Гаусса, который состоит из двух этапов, метод Гаусса – Жордана выполняется за один проход по столбцам. Как и в методе Гаусса для решения СЛАУ расширенная матрица системы преобразуется с помощью таких операций: смена мест двух строк; умножение всех элементов строки на некоторое число, не равное нулю; прибавление к элементам одной строки соответствующих элементов другой строки, умноженных на любой множитель.

Как и в методе Гаусса, можно менять местами и столбцы матрицы системы, но нужно запоминать новый порядок переменных в уравнениях.

3 Параллельное решение СЛАУ методом Якоби [7] в конфигурации на 8 потоков.

Метод Якоби сильно отличается от таких методов как Гаусса или Камера, т.к. является итеративным. Если для метода Гаусса можно заранее определить примерное количество выполняемых операций, то для итеративных методов сделать это нельзя. Итеративный процесс поиска решения предполагает повышение точности с каждой последующей итерацией.

СЛАУ задается матрицей коэффициентов A и векторами X (неизвестных) и B (свободных членов).

Алгоритм поиска корней можно описать следующим образом:

- ввод размерности (n), точности (ϵ), матриц системы, приближенных значений неизвестных (элементы начального приближения могут быть равно нулю) и свободных членов;
- расчет приближения – вектора (формула 1):

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

где $y_i = \frac{1}{a_{i,i}} * (b_i - \sum_{j=0, j \neq i}^n (a_{i,j} * x_j))$, для $i = 1 \dots n$;

- вычисление погрешности текущего приближения (формула 2):

$$e_{act} = \max(|y_i - x_i|), i = 1 \dots n; \quad (2)$$

- если $e_{act} > \epsilon$, то $X = Y$ и переход на п.2
- конец – результат работы алгоритма – вектор X .

Результаты сравнения скорости параллельных вычислений, а значит и эффективности указанных библиотек, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты сравнения скорости решения СЛАУ библиотеками PPL и TPL

Размерность СЛАУ	Метод решения	Конфигурация потоков	Время решения, с.	
			PPL C++	TPL .Net C#
1	2	3	4	5
500×500	Гаусса	1	10,322	0,694
	Гаусса-Жордана	1	2,289	1,047
		2	2,279	0,634
		4	2,231	0,516
		8	2,236	0,517
		12	2,297	0,475
	Якоби	8	0,051	0,016
1000×1000	Гаусса	1	73,41	4,756
	Гаусса-Жордана	1	16,607	7,346
		2	16,556	4,166
		4	16,567	3,018
		8	16,571	2,566
		12	16,558	2,685
	Якоби	8	0,196	0,039
1500×1500	Гаусса	1	247,639	15,758
	Гаусса-Жордана	1	54,847	23,277
		2	55,374	11,981
		4	55,390	8,595
		8	55,243	7,494
		12	54,933	7,395
	Якоби	8	0,394	0,065

Для удобства восприятия, отобразим полученные результаты замеров времени вычислений СЛАУ с помощью графика (рисунок 1). Для большей читаемости, линии графиков одной и той же технологии, но с разным числом используемых потоков и минимальным отличием в скорости вычислений, были объединены в одну линию.

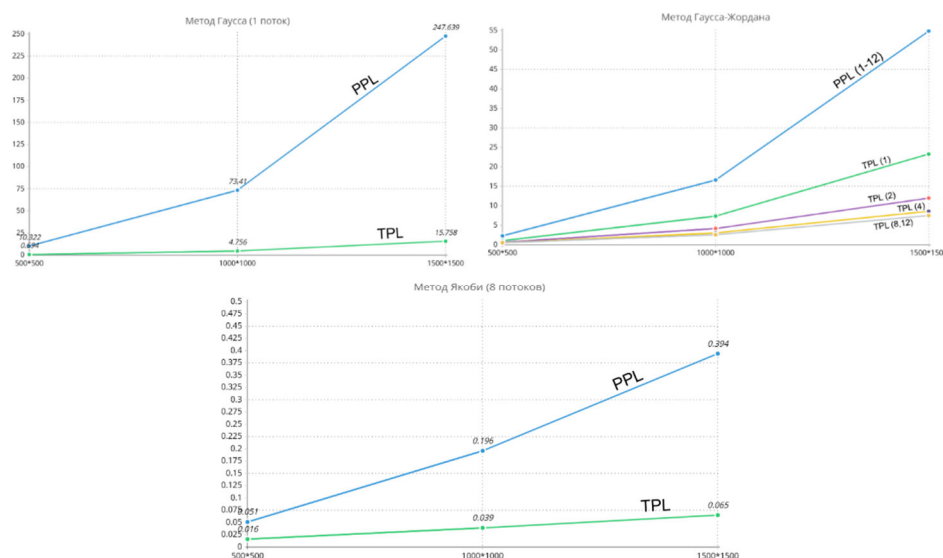


Рисунок 1 – Графики времени вычислений СЛАУ с помощью разных математических методов и конфигураций потоков

Заключение. Проведенное сравнительное исследование эффективности библиотек PPL для C++ и TPL для C#.NET при решении систем линейных алгебраических уравнений позволило получить значимые результаты, демонстрирующие различные аспекты производительности этих технологий параллельного программирования.

Анализ экспериментальных данных выявил преимущество в скорости выполнения вычислений решений на основе TPL (.NET C#) по абсолютному времени выполнения для всех рассматриваемых размерностей СЛАУ. Наилучшие показатели быстродействия показывает

метод Гаусса-Жордана с 12 потоками: TPL демонстрирует ускорение в 4.8 раза для системы 500×500 , в 6.2 раза для 1000×1000 и в 7.4 раза для 1500×1500 по сравнению с PPL. Это свидетельствует о более эффективной реализации механизмов параллельных вычислений.

Особого внимания заслуживает эффективность метода Якоби, где TPL показывает преимущество более чем в 3 раза для всех размерностей. Это указывает на оптимальную работу алгоритмов балансировки нагрузки и управления потоками в TPL, особенно для итерационных методов с высокой степенью параллелизма.

Наблюдаемое превосходство TPL можно объяснить несколькими факторами:

1 Оптимизированная работа планировщика задач в .NET, эффективно использующая work-stealing алгоритмы для балансировки нагрузки между потоками.

2 Современные JIT-оптимизации в среде выполнения .NET, которые адаптируют код под конкретную аппаратную платформу в процессе выполнения.

3 Эффективное управление памятью через сборщик мусора, минимизирующее фрагментацию памяти при работе с большими массивами данных.

4 Низкие накладные расходы на синхронизацию потоков благодаря усовершенствованным примитивам синхронизации в последних версиях .NET.

Полученные результаты показывают преимущество нативных решений на C++ над управляемым кодом C# в скорости решения задач вычислительной математики. Тем не менее, выбор языка программирования и соответствующего стека технологий должен зависеть от решаемой задачи.

Список литературы

1. Самарский, А. А. Численные методы : учебник для вузов / А. А. Самарский, А. В. Гулин. – Москва : Наука, 2019. – 432 с. – ISBN 978-5-02-040123-4.
2. Microsoft Documentation [Электронный ресурс]. – Parallel Patterns Library (PPL). – Режим доступа: <https://docs.microsoft.com/en-us/cpp/parallel/concrtp/parallel-patterns-library-ppl>. Дата доступа: 03.01.2026.
3. Microsoft Documentation [Электронный ресурс]. – Task Parallel Library (TPL). – Режим доступа: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/standard/parallel-programming/task-parallel-library-tpl>. Дата доступа: 03.01.2026.
4. Гергель, В. П. Теория и практика параллельных вычислений / В. П. Гергель. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Интернет-Университет Информационных Технологий (ИИТГУИТ), 2021. – 512 с. – ISBN 978-5-9556-0152-7.
5. Фалейчик, Б. В. Вычислительные методы алгебры: базовые понятия и алгоритмы : учеб.-метод. пособие / Б. В. Фалейчик. – Минск : БГУ, 2010. – 42 с.
6. Лунгу, К. Н. Высшая математика : руководство к решению задач : учеб. пособие. В 2 ч. Ч. I / К. Н. Лунгу, Е. В. Макаров. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 216 с.
7. Масловская, Л. В. Численные методы алгебры : учеб. пособие / Л. В. Масловская, О. М. Масловская. – Одесса : Укрполиграф, 2006. – 146 с.

UDC 004.021

COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF PARALLEL COMPUTING USING THE PPL AND TPL LIBRARIES FOR SOLVING SYSTEMS OF LINEAR ALGORITHMIC EQUATIONS

Rusetskii A.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Loginova I.P. – PhD in Technical Science, associate professor of the department of Economic Informatics

Annotation. This article provides a comparative analysis of the efficiency of two parallel programming libraries – Parallel Patterns Library (PPL) for C++ and Task Parallel Library (TPL) for C#.NET – in solving systems of linear algebraic equations. The study includes testing on systems of dimensions 500×500 , 1000×1000 and 1500×1500 using the Gaussian method, the Gauss-Jordan method and the Jacobi method.

Keywords. Parallel computing, systems of linear equations, Gaussian method, PPL, TPL, performance benchmarking, algorithm scalability, multithreaded programming.

ПРИМЕНЕНИЕ РАСШИРЕННЫХ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ШАБЛОНОВ ДЛЯ УЧЕТА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Косарева Е.М., Кожевников Д.О.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель: Лихачевский Д.В. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС, заместитель начальника
Секретариата Наблюдательного совета ПВТ*

Аннотация. Проведено сравнение алгоритмов формирования стандартного и расширенного биометрического шаблона. Определено, что применение расширенных биометрических шаблонов в контексте задачи биометрической идентификации позволяет учитывать функциональное состояние пользователя, как один из факторов, влияющих на точность биометрии.

Ключевые слова: биометрическая идентификация, биометрические шаблоны, биометрические признаки, психофизиологическое состояние

Введение. В условиях распространения процессов цифровизации на все сферы функционирования общества и государства, на ряду с классическими методами обеспечения безопасности, активно применяются автоматизированные системы, основанные на методах биометрической идентификации. Они находят широкое применение в различных сферах, в том числе банковском секторе, на объектах критической инфраструктуры и т.д. При этом эффективность подобных систем традиционно основывается на предположении об относительной стабильности индивидуальных биометрических признаков пользователя. Однако в реальных условиях функционирования, такие признаки подвержены вариативности, обусловленной изменением психофизиологического состояния человека.

Под воздействием стресса, эмоционального напряжения, утомления и т.д. происходят изменения на физиологическом и поведенческом уровне. Это проявляется в изменении голосовых параметров, динамики моторных действий, мимических реакций, микродвижений и других показателей, что потенциально приводит к росту внутриклассовой вариативности биометрических данных и увеличению вероятности ошибок идентификации.

В связи с этим, актуальной является задача использования расширенных биометрических шаблонов как одного из методов учета психофизиологического (функционального) состояния пользователя в системах биометрической идентификации.

В данной статье авторами показано, что переход от использования классических биометрических шаблонов к расширенным позволяет учитывать вариативности биометрических признаков, вызванную колебаниями психофизиологического состояния пользователя.

Основная часть. Функциональное состояние – это совокупность (симптомокомплекс) различных характеристик, процессов, свойств и качеств, обуславливающих уровень активности систем, эффективность деятельности и поведение [1]. Функциональное состояние оказывает влияние на биометрические признаки, используемые в задачах идентификации пользователя. Именно изменения функциональных состояний обуславливают изменчивость количественных и качественных характеристик биометрических параметров одного и того же человека во времени.

Для корректной интерпретации результатов идентификации в условиях изменчивости биометрических признаков необходимо рассмотреть структуру биометрического шаблона как формализованного представления совокупности этих признаков и их допустимой вариативности.

Биометрический шаблон – совокупность характеристик, выделенных из биометрического образца, достаточная для идентификации или верификации личности [2].

Структура стандартного биометрического шаблона представляет собой фиксированный вектор признаков, извлеченных из одного или нескольких эталонных образцов (формула 1).

$$T = \mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n), \quad (1)$$

где μ_i – среднее значение i -го биометрического признака;

n – количество используемых признаков.

Процесс формирования биометрического шаблона представлен на рисунке 1.

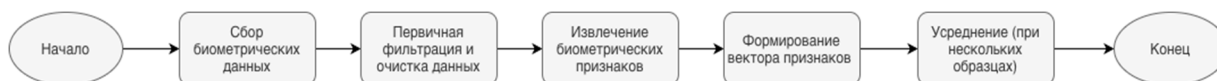


Рисунок 1 – Алгоритм формирования биометрического шаблона

Структура расширенного биометрического шаблона, в котором учитывается влияние психофизиологического состояния пользователя на биометрические параметры, представляет собой совокупность статистических параметров распределения биометрических признаков.

Пусть вектор биометрических признаков имеет размерность n (формула 2):

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T, \quad (2)$$

где x_i – i -й биометрический признак;

n – количество используемых признаков.

Тогда биометрический шаблон пользователя можно определить как параметризованную модель, в соответствии с формулой 3:

$$T = \{\mu, \Sigma\}, \quad (3)$$

где T – биометрический шаблон пользователя;

μ – вектор средних значений признаков;

Σ – ковариационная матрица признаков.

Вектор средних значений задает наиболее вероятное и устойчивое значение признака. Его можно описать формулой 4.

$$\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)^T, \quad (4)$$

где μ_i – среднее значение i -го биометрического признака;

n – количество используемых признаков.

Ковариационная матрица, в свою очередь, описывает разброс биометрических признаков и взаимосвязь их изменений. Она показывает, насколько изменения одного биометрического признака связаны с изменениями другого и как сильно признаки варьируются относительно среднего значения. Ковариационную матрицу можно представить формулой 5.

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & cov(x_2, x_1) & \dots & cov(x_1, x_n) \\ cov(x_2, x_1) & \sigma_2^2 & \ddots & cov(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ cov(x_n, x_1) & cov(x_n, x_2) & \dots & \sigma_n^2 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где σ_i^2 – дисперсия i -го признака, характеризующая его разброс;

$cov(x_i, x_j)$ – ковариация между i -м и j -м признаками.

Таким образом, расширенный биометрический шаблон позволяет задать многомерную область допустимых значений в пространстве признаков, что позволяет учитывать изменения биометрических параметров, вызванных колебаниями функционального состояния пользователя, и их взаимосвязи. Процесс формирования расширенного биометрического шаблона представлен на рисунке 2.



Рисунок 2 – Алгоритм формирования расширенного биометрического шаблона

Подводя итог, применение расширенных биометрических шаблонов в задаче идентификации личности позволяет адаптировать систему к колебаниям психофизиологического состояния пользователя и потенциально может привести к снижению количества ложных результатов идентификации. При этом функциональное состояние пользователя рассматривается не как фактор снижения точности биометрии, а как один из факторов, который может учитываться при построении адаптивной модели биометрической идентификации.

Заключение. Выполнено описание перехода от стандартных биометрических шаблонов к расширенным в контексте задачи биометрической идентификации. Отмечено, что в отличие от стандартного, расширенный шаблон включает в себя параметры вариативности (дисперсию, ковариационную структуру, допустимые диапазоны отклонений и динамические характеристики) биометрических признаков, что позволяет учитывать их естественные колебания, обусловленные психофизиологическим состоянием, и тем самым повышать устойчивость системы идентификации к функциональным изменениям пользователя.

Список литературы

1. Функциональные состояния как регулятор профессиональной деятельности [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://uch.lecture.center/psihologiya-truda-uchebniki/funktsionalnyie-sostoyaniya-kak-regulyator-25463.html?utm>. Дата доступа: 23.02.2026.
2. ГОСТ Р 52633.5-2011 «Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа». – М.: Стандартинформ, 2011.

UDC 004.93'1

APPLICATION OF EXTENDED BIOMETRIC TEMPLATES TO ACCOUNT FOR THE USER'S FUNCTIONAL STATE IN IDENTIFICATION

Kosareva E.M., Kozhevnikov D.O.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Likhachevski D.V. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD, Deputy Head of the Secretariat of the Supervisory Board of the High-Tech Park

Annotation. A comparison of algorithms for generating standard and extended biometric templates was conducted. It was determined that the use of extended biometric templates in the context of biometric identification allows for the user's functional state to be taken into account as one of the factors influencing biometric accuracy.

Keywords: biometric identification, biometric templates, biometric characteristics, psychophysiological state

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ПОИСКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ДЛЯ ТОРГОВЛИ НА МАРКЕТПЛЕЙСАХ

Крино О.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Косарева Е.М. – магистр, ассистент кафедры ПИКС

Аннотация. Экспериментально исследовано функционирование программного средства поиска перспективных торговых направлений в условиях обработки больших объемов данных. Установлено, что снижение достоверности формируемых рекомендаций наступает при увеличении доли некорректных записей в JSON-пакетах свыше 7,4 % от общего объема выборки. Предложена методика контроля бизнес-логики программного средства, основанная на верификации функциональных блоков обработки данных. Разработаны структурные схемы взаимодействия серверной и клиентской частей программного средства для обеспечения точности бизнес-анализа.

Ключевые слова: маркетплейс, бизнес-анализ, программное средство, бизнес-логика, REST-архитектура, автоматизация аналитики

Введение. Современные требования к автоматизации аналитических процессов, связанные с преобразованием больших объемов данных с маркетплейсов в обоснованные рекомендации, выдвигают задачу контроля качества бизнес-логики программных средств на одно из первых мест. Программные решения, имеющие распределенную REST-архитектуру, обладают повышенной чувствительностью к структуре и полноте входных данных, что требует поиска дефектов в алгоритмах ранжирования на ранних этапах [1]. В данной статье автором показано, что ухудшение качества выходных рекомендаций программного средства наступает при накоплении статистических аномалий, что может привести к принятию ошибочных стратегических решений по развитию торговли.

Основная часть. При контроле функционирования программного средства (ПС), предназначенного для поиска перспективных направлений, необходимо решить две задачи:

- обеспечить достаточную полноту автоматизированного тестирования алгоритмов;
- определить функциональные блоки (ФБ), ответственные за возникновение логических ошибок в аналитических отчетах.

Для обеспечения чистоты эксперимента и проверки корректности взаимодействия компонентов системы процесс анализа был разделен на две области, в соответствии с рисунком 1.

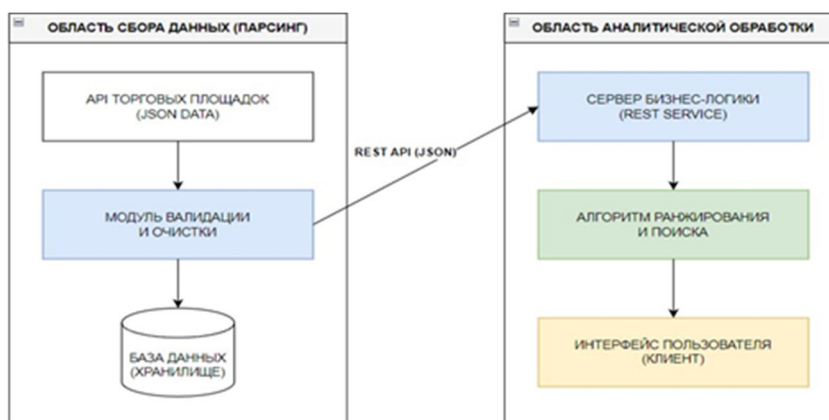


Рисунок 1 – Схема взаимодействия областей сбора данных и аналитической обработки

На представленной схеме (рисунок 1) визуализирована высокоуровневая архитектура программного средства, спроектированная согласно принципам распределенных систем. Взаимодействие компонентов организовано через разделение зон ответственности на две ключевые области: сбор данных и их глубокую аналитическую обработку.

Опишем каждую из областей:

1 Область сбора данных (Парсинг). Данная область отвечает за первичную интеграцию с внешними источниками. Процесс начинается с обращения к *API* торговых площадок, откуда поступают массивы данных о продажах, остатках и ценах в формате *JSON*. Ключевым звеном здесь является модуль валидации и очистки, который выполняет предварительную фильтрацию «сырых» данных. Его задача – это исключение аномальных всплесков (например, самовыкупов или технических ошибок площадки), которые могут исказить итоговый результат. После верификации структурированная информация сохраняется в базе данных (хранилище), обеспечивая историчность данных для последующего трендового анализа.

2 Область аналитической обработки. Эта область представляет собой «ядро» системы, реализованное в виде сервера бизнес-логики (*REST Service*). Использование архитектурного стиля *REST* позволяет изолировать вычислительные процессы от интерфейсной части. Основным функциональным элементом здесь является алгоритм ранжирования и поиска, который на основе математических моделей преобразует сухие цифры в конкретные показатели перспективности рыночных ниш. Конечным этапом является передача обработанных данных в интерфейс пользователя (клиент), где бизнес-аналитик получает визуализированные рекомендации для принятия управленческих решений.

Связующим звеном между областями выступает *REST API (JSON)*. Такое решение обеспечивает масштабируемость системы: модуль сбора данных может работать независимо от аналитического модуля, а передача данных в универсальном формате *JSON* гарантирует высокую скорость обработки и совместимость компонентов. Данная структура полностью соответствует техническим требованиям дипломного проекта по созданию распределенного программного обеспечения с четким разделением клиентской и серверной частей.

Испытуемое программное средство было представлено в виде ряда функциональных блоков, реализованных в архитектурном стиле *REST*. Для тестирования ФБ был разработан набор тестовых программ (ТП), обеспечивающих последовательность верификации бизнес-логики в составе ПС (таблица 1):

Таблица 1 – Последовательность тестирования ФБ МК

№ тестовой программы	Область тестирования
ТП1	верификация корректности парсинга <i>JSON</i> -данных серверной частью
ТП2	тестирование алгоритмов ранжирования в модуле бизнес-логики

На рисунке 2 представлена логическая последовательность работы аналитического модуля, обеспечивающая преобразование входных массивов данных в обоснованные бизнес-рекомендации. Алгоритм включает в себя несколько критических стадий обработки:

1 Инициализация и загрузка. Процесс начинается с получения *JSON*-пакетов через *REST*-интерфейс. На этом этапе программное средство подготавливает среду для обработки данных, извлекая необходимые параметры (цены, объемы продаж, количество конкурентов).

2 Контроль целостности и верификация. Данный этап является ключевым для обеспечения достоверности анализа. Программа проверяет структуру *JSON* и полноту данных. Согласно проведенным исследованиям, именно на этом этапе выявляется «зашумленность» выборки. Если уровень ошибок превышает допустимый предел, система инициирует цикл дозагрузки данных для предотвращения искажения итоговых индексов.

3 Вычисление аналитических показателей. После успешной валидации модуль переходит к расчету интегральных показателей. Тренд спроса: определение динамики продаж за ретроспективный период. Уровень конкуренции: анализ концентрации продавцов в нише. Индекс прибыльности: сопоставление потенциальной выручки и затрат. Формирование

ивывод рекомендаций. На финальном этапе алгоритм классифицирует ниши по степени перспективности и формирует отчет, который передается в интерфейс пользователя (клиентскую часть).

Общий алгоритм функционирования модуля аналитики, отвечающего за поиск перспективных ниш, представлен в виде блок-схемы (рисунок 2). Данная схема отражает логику преобразования «сырых» данных о продажах в конкретные рекомендации.

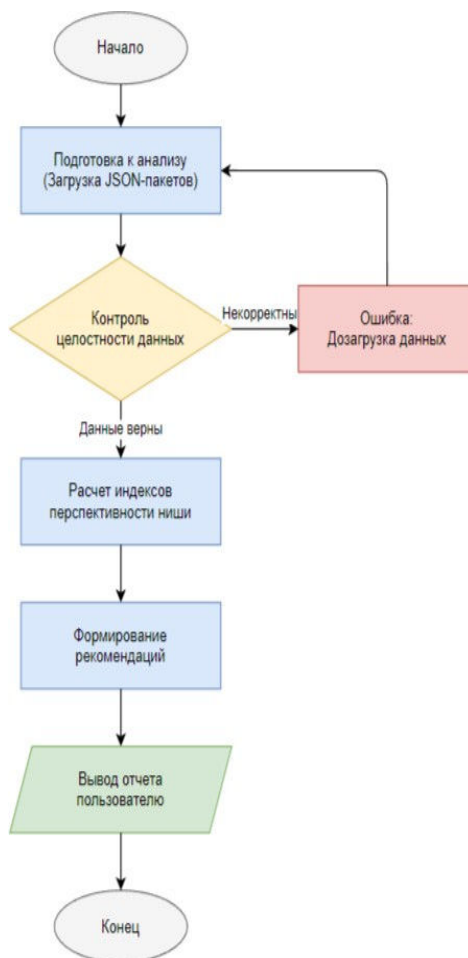


Рисунок 2 – Алгоритм функционального аналитического модуля программного средства

Контроль функционирования блоков (ФБ) программного средства осуществлялся путем циклической синхронизации с *API* торговых площадок. После прохождения всего набора тестовых сценариев производился глубокий анализ отклонения расчетных показателей от эталонных значений.

Установлено, что выход из строя или некорректный результат работы «модуля аналитики» чаще всего обусловлен спецификой организации бизнес-логики. Данный модуль строится на базе процедур агрегации, обладающих не только режимами хранения информации, но и программными фильтрами для отсеечения аномальных всплесков продаж (самовыкупов). Реализация таких механизмов верификации на стороне сервера делает аналитический блок чувствительным к пропускам или искажениям данных, в отличие от простых транспортных модулей системы.

Заключение. Выполнен анализ влияния качества входных данных на результаты поиска перспективных направлений в разработанном программном средстве. Впервые установлено, что в аналитическом блоке ПС при накоплении ошибок в *JSON*-структурах свыше 7,4 % происходят критические искажения в отчетах, что ведет к некорректному выполнению запрограммированных функций. Определено, что изменения в точности анализа обусловлены

отсутствием эффективной фильтрации аномалий на этапе первичной обработки данных. Предложена методика функционального контроля ПС, основанная на разделении процессов сбора и анализа данных, что позволяет своевременно выявлять логические дефекты в программном коде.

Список литературы

1. Kleppmann, M. *Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems* / Martin Kleppmann. – Sebastopol : O'Reilly Media, 2017. – 616 p. – ISBN 978-1-449-37332-0.
2. Fielding, R. T. *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures* / Roy Thomas Fielding // *Slovak international scientific journal*. – 2021. – Vol. 2, N 48. – Pp. 14–29
3. Алексеев, В. Ф. Проектирование и разработка распределенных информационных систем на базе REST-архитектуры / В. Ф. Алексеев // *Вестник БГУИР*. – 2022. – № 4. – С. 45–52.
4. Вигерс, К. Разработка требований к программному обеспечению / К. Вигерс, Д. Битти. – М. : БХВ-Петербург, 2019. – 736 с. – ISBN 978-5-9775-3348-5.

UDC 004.4:339.1

SOFTWARE TOOL FOR FINDING PROMISING DIRECTIONS FOR TRADING ON MARKETPLACES

Krino O.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Kosareva E.M. –master of tech. sciences, assistant of the department of ICSD

Annotation. The functioning of a software tool for finding promising trading directions under conditions of processing large volumes of data has been experimentally investigated. It was found that a critical decrease in the reliability of the generated recommendations occurs when the share of incorrect or incomplete records in JSON packets exceeds 7.4% of the total sample volume. A method for controlling the business logic of a software tool based on the verification of functional blocks is proposed. Schemes for the interaction of data collection and processing areas, as well as an algorithm for the analytical module's operation, have been developed.

Keywords: marketplace, business analysis, software tool, business logic, REST architecture, analytics automation

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ БАНКОВСКОГО МОШЕННИЧЕСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНЫХ АЛГОРИТМОВ

Правоторова А.Ю.

*Академия управления при Президенте Республики Беларусь,
г. Минск, Республика Беларусь*

Шабанович Р.А. – ст. преподаватель кафедры УИР

Аннотация. Данная работа представляет разработку интеллектуальной системы для выявления сложных мошеннических схем в банковских транзакциях. Система реализует гибридный подход, объединяющий квантово-графовый анализ, нейроморфные вычисления и эволюционную оптимизацию для обнаружения новых и адаптивных угроз. Решение обеспечивает высокую точность обнаружения при минимальном уровне ложных срабатываний в условиях реального времени.

Ключевые слова: обнаружение мошенничества, гибридные алгоритмы, транзакции, анализ, нейроморфные вычисления, банк, безопасность

Введение. Современное банковское мошенничество эволюционирует быстрее традиционных систем защиты. Классические подходы на основе статических правил неэффективны против скоординированных атак с использованием социальной инженерии и искусственной легитимизации паттернов [1]. Данная работа предлагает инновационную архитектуру системы обнаружения на основе синтеза четырех методологий: квантово-вдохновленных графовых алгоритмов [2], нейроморфных вычислений [3], гиперграфового анализа [4] и эволюционной оптимизации [5]. Гибридный подход преодолевает ограничения отдельных методов, создавая систему для выявления как известных, так и новых схем мошенничества.

Основная часть. В основе системы лежит квантово-вдохновленный процессор графовой обработки, который имитирует принципы квантовой механики для анализа сложных сетевых структур финансовых транзакций.

В отличие от классических графовых алгоритмов, которые анализируют связи между узлами по отдельности, квантовый подход позволяет рассматривать всю сеть как единую квантовую систему, где состояния представляют собой суперпозиции возможных путей транзакций. Этот метод особенно эффективен для обнаружения слабых корреляций и скрытых зависимостей, которые не проявляются при статистическом анализе отдельных пар узлов. Алгоритм квантовой ходьбы реализует интерференцию амплитуд вероятностей, при которой легитимные паттерны взаимно гасятся, а аномальные – усиливаются, что аналогично принципу квантового усиления в физических системах [6]. Технически это достигается через вычисление фазовых сдвигов для каждой пары вершин графа с последующим накоплением интерференционной картины в течение множества временных итераций. Важным аспектом является использование экспоненциального затухания для моделирования декогеренции – процесса, который в реальных квантовых системах приводит к потере когерентности, но в нашем случае служит фильтром для устранения случайных шумовых корреляций.

Второй ключевой компонент системы – нейроморфная сеть, архитектура которой заимствована из принципов организации коры головного мозга. В отличие от традиционных нейронных сетей, основанных на математических абстракциях, нейроморфная реализация воспроизводит биологически правдоподобные механизмы обработки информации, включая спайковую передачу сигналов, зависящую от времени пластичность (STDP) [7] и модуляцию нейромедиаторами. Каждый искусственный нейрон в системе поддерживает состояние мембранного потенциала, которое изменяется под влиянием входных сигналов, и генерирует спайк при превышении порогового значения. Этот подход обеспечивает временную точность обработки, критически важную для анализа последовательностей финансовых операций, где

временные интервалы между транзакциями часто содержат диагностически значимую информацию. Система нейромедиаторов моделирует три ключевых химических регулятора: дофамин, выполняющий функцию системы вознаграждения и усиливающий связи, соответствующие выявленным аномальным паттернам; серотонин, стабилизирующий обучение и предотвращающий переобучение; и норадреналин, повышающий чувствительность системы к неожиданным событиям [8].

Для моделирования многомерных отношений в финансовых операциях система использует гиперграфы – математическую структуру, обобщающую понятие графа, где одно ребро может соединять произвольное количество вершин. Каждое гиперребро инкапсулирует не только факт транзакции, но и многомерные метаданные, включая временные метки, географические координаты, категории операций и поведенческие контексты. Аналитический модуль вычисляет набор топологических метрик, характеризующих структурные свойства гиперграфа: коэффициент кластеризации, отражающий локальную плотность связей; распределение центральности вершин, показывающее неравномерность влияния различных узлов сети; спектральный разрыв, являющийся индикатором связности всей системы. Для вычисления спектральных характеристик реализован алгоритм степенных итераций. Обнаружение аномальных структур основано на многокритериальной оценке, учитывающей отклонения в весовом распределении, нестандартные размеры гиперребер и темпоральные аномалии. При этом система способна выявлять не только явные нарушения, но и слабые сигналы, которые в отдельности могут казаться легитимными, но в совокупности образуют подозрительные паттерны.

Четвертый компонент системы – эволюционный оптимизатор, который непрерывно совершенствует набор правил обнаружения мошенничества, используя принципы генетических алгоритмов. В отличие от статических систем правил, которые быстро устаревают, эволюционный подход позволяет адаптироваться к изменяющимся тактикам мошенников. Каждое правило кодируется в виде хромосомы, содержащей гены параметров и весов, определяющих чувствительность к различным типам аномалий. Система поддерживает пять категорий правил, каждая из которых специализируется на определенном аспекте анализа: временные корреляции выявляют нестандартные временные паттерны в последовательностях операций; кластеризация сумм обнаруживает аномальные группировки транзакций по величине; сетевая центральность анализирует структурную позицию аккаунта в транзакционном графе; последовательные паттерны распознают сложные поведенческие шаблоны; географические аномалии выявляют логистические несоответствия в операциях. Процесс оптимизации использует турнирную селекцию и адаптивную мутацию, где скорость мутаций динамически регулируется в зависимости от эффективности конкретной хромосомы – менее успешные правила подвергаются более интенсивным изменениям, в то время как эффективные правила стабилизируются. Оценка приспособленности происходит на синтетически сгенерированных данных, моделирующих как легитимные, так и мошеннические операции, при этом система способна продолжать обучение на реальных данных без существенной деградации производительности.

Интеграция компонентов достигается через многоуровневую архитектуру, где каждая подсистема вносит вклад в формирование итоговой оценки. Процесс обработки транзакции начинается с преобразования исходных данных в многомерный вектор признаков, включающий нормализованные финансовые показатели, темпоральные характеристики, категориальные атрибуты и контекстуальные метаданные. Нейроморфная сеть производит первичную оценку, используя биологические механизмы распознавания паттернов, и формирует спайковый выходной вектор, где активность каждого нейрона соответствует определенному аспекту анализируемой транзакции. Одновременно эволюционный оптимизатор применяет текущий набор правил, генерируя оценку по каждому из пяти категориальных направлений анализа. Параллельно транзакция интегрируется в гиперграфовую модель, где производится структурный анализ в контексте предыдущих операций. Итоговая оценка формируется как взвешенная комбинация четырех компонентов с коэффициентами, отражающими доверие к каждому источнику на основе исторической точности. Критически важным аспектом архитектуры является механизм обратной связи, где результаты обнаружения используются для адаптивной настройки всех компонентов:

нейроморфная сеть регулирует пороги активации нейронов, эволюционный оптимизатор обновляет популяцию правил, гиперграфовая модель пересчитывает веса связей, а база паттернов пополняется новыми схемами.

Заключение. Предложенная гибридная архитектура демонстрирует значительный потенциал благодаря синергии разнородных подходов. Ее ключевое преимущество – способность выявлять сложные, распределенные схемы мошенничества, недоступные традиционным системам. Адаптивность, обеспеченная эволюционной оптимизацией и нейроморфным обучением, позволяет непрерывно совершенствоваться. Перспективные направления: интеграция с анализом неструктурированных данных, распределенная обработка для крупных банковских групп, прогнозирование новых схем. Внедрение таких систем способно повысить безопасность финансовых операций и снизить экономические потери.

Список литературы

1. Эконометрика в биржевой аналитике: современные подходы и методы –> Machine Learning Guru | : [сайт]. – Дмитрий Крылов, 2026. – URL: https://mlgu.ru/2401/?utm_source=yandex&utm_medium=organic (дата обращения: 20.01.2026).
2. Revolutionary Breakthrough: Graphene Processor Makes AI 10X Faster : [bibliographic database]. – [Tolify.ai], 2026. – URL: <https://www.toolify.ai/ai-news/revolutionary-breakthrough-graphene-processor-makes-ai-10x-faster-1509408> (date of access: 22.01.2026).
3. Neuromorphic Hardware and Computing | by IEEE Computer Society - VIT | Medium : [bibliographic database]. – [Medium], 2026. – URL: https://medium.com/@IEEE_Computer_Society_VIT/neuromorphic-hardware-and-computing-f7cc8f71ed58 (date of access: 22.01.2026).
4. Гиперграфы и устойчивость сетей: как математика предотвращает кризисы : [сайт]. – Innovanews.ru, 2008-2026. – URL: <https://innovanews.ru/info/news/internet/matematika-khaosa-kak-predskazat-kogda-rukhnnet-sistema/> (дата обращения: 25.01.2026).
5. Руководство по эволюционным алгоритмам | Ultralytics : [сайт]. – Ultralytics, 2008-2026. – URL: <https://www.ultralytics.com/ru/blog/what-is-an-evolutionary-algorithm-a-quick-guide> (дата обращения: 26.01.2026).
6. Frontiers | Quantum Walk-Based Vehicle Routing Optimisation : [bibliographic database]. – [Frontiers Media SA], 2026. – URL: <https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2021.730856/full> (date of access: 27.01.2026).
7. Frontiers | Adaptive STDP-based on-chip spike pattern detection : [bibliographic database]. – [Frontiers Media SA], 2026. – URL: <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2023.1203956/full> (date of access: 27.01.2026).
8. Нейромедиаторный обмен | Статьи и материалы на сайте «Chromolab». : [сайт]. – Chromolab, 2026. – URL: <https://www.chromolab.ru/spetsialistam/stati-i-materialy/neyromediatornyy-obmen/> (дата обращения: 02.02.2026).

UDC 004.415.23

DEVELOPMENT OF A BANK FRAUD DETECTION SYSTEM USING HYBRID ALGORITHMS

Pravotorova A.Yu.

Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Shabanovich R.A. – Senior Lecturer of the Department of Management Information Resources

Annotation. This paper presents the development of an intelligent banking fraud detection system designed to identify complex fraudulent transaction schemes in real time. The proposed solution is based on a hybrid approach integrating quantum-inspired graph analysis, neuromorphic computing, hypergraph modeling, and evolutionary optimization techniques. The system enables the detection of both known and previously unseen adaptive fraud patterns by combining structural, temporal, and behavioral transaction analysis. Experimental architectural evaluation demonstrates that the hybrid model provides high fraud detection accuracy while maintaining a low false positive rate under dynamic financial environments. The adaptive learning mechanisms embedded in the architecture ensure continuous refinement of detection rules and pattern recognition models, making the system suitable for deployment in modern banking infrastructures.

Keywords: fraud detection, hybrid algorithms, banking transactions, graph analysis, neuromorphic computing, financial security

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ БИТОВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В ИНФОРМАЦИОННО-КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ НА ПРИМЕРЕ ЗАДАЧИ О РЮКЗАКЕ 0-1

Марковец Р.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Мигалевич С.А. – магистр техн. наук, ст. преподаватель кафедры информатики

Аннотация. Экспериментально исследована практическая эффективность битовой оптимизации динамического программирования для задачи о рюкзаке 0-1 в контексте вычислительных модулей информационно-компьютерных систем. Установлено, что реальное ускорение составляет от 15,6 до 21,0 раза в зависимости от распределения весов предметов, что в 3-4 раза ниже теоретического предела ускорения в 64 раза. Выявлены основные факторы расхождения: кэш-промахи при обработке битового множества, накладные расходы библиотечной реализации и межсловные сдвиги.

Ключевые слова: битовое множество, задача о рюкзаке, оптимизация алгоритмов, практическая эффективность, спортивное программирование, информационно-компьютерные системы, вычислительные модули

Введение. Битовая оптимизация динамического программирования (далее – ДП) на основе битовых множеств применяется в информационно-компьютерных системах реального времени [1]:

- в логистике – для решения задачи о рюкзаке 0-1 (далее – задача о рюкзаке);
- в телекоммуникациях – при распределении каналов;
- в криптоанализе;
- во встраиваемых системах и сетевых устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами.

Повсеместно требуется обрабатывать десятки тысяч предметов за миллисекунды, и битовая оптимизация позволяет уложиться в жесткие временные рамки. Однако на практике теоретический выигрыш в 64 раза недостижим из-за факторов, не учитываемых асимптотической моделью.

При проектировании вычислительных модулей опираться только на оценку ускорения в 64 раза недостаточно. Реальная производительность ограничена задержками памяти, кэш-промахами, накладными расходами языковых конструкций и свойствами входных данных. Предсказать ускорение без эксперимента невозможно, поэтому цель работы – количественно оценить фактическую эффективность битовой оптимизации.

В исследовании планируется сравнить наивное ДП на булевом массиве и оптимизированную версию с *bitset* на различных наборах весов. Будут измерены ускорение и проведен анализ ограничивающих факторов. Результаты позволят разработчикам информационно-компьютерных систем точнее прогнозировать эффект от данной оптимизации.

Основная часть. Рассматривается классическая задача о рюкзаке [2]. Имеется множество из n предметов, каждый предмет i характеризуется целым неотрицательным весом w_i . Вместимость рюкзака характеризуется целым неотрицательным числом W . Требуется выбрать подмножество предметов так, чтобы их суммарный вес не превышал W и был максимален.

Наивный метод ДП использует булев массив dp размером $W+1$, где элемент с индексом s показывает, достижима ли сумма s . Начальное состояние: достижима только нулевая сумма. Для каждого предмета весом w массив обновляется в порядке убывания s от W до w по формуле (1):

$$dp[s] := dp[s] \text{ OR } dp[s - w], \quad (1)$$

где OR – логическое ИЛИ.

После обработки всех предметов ответом служит наибольший индекс s , для которого значение истинно. Временная сложность такого решения составляет $O(nW)$, память – $O(W)$.

Булев массив можно заменить битовым множеством (*bitset*) [3]. В такой структуре каждый бит соответствует одной сумме: если бит установлен, сумма достижима. Битовое множество хранится как последовательность машинных слов, что позволяет выполнять логические операции и сдвиги сразу над группами битов. Добавление предмета весом w сводится к формуле (2):

$$B := B \text{ OR } (B \ll w), \quad (2)$$

где B – текущее битовое множество;

$\ll w$ – побитовый сдвиг влево на w позиций.

Эта операция одновременно добавляет все суммы, увеличенные на w , к уже достигнутым. Современные 64-разрядные процессоры обрабатывают 64 бита за один такт, что в идеальных условиях должно давать ускорение в 64 раза по сравнению с наивной версией. Однако на практике достичь такого ускорения мешают ограничения аппаратного обеспечения и накладные расходы, связанные с реализацией битовых множеств.

Экспериментальное исследование проводилось на ноутбуке с 64-разрядным процессором *Intel* тактовой частотой около 3 ГГц. Выбор платформы не является определяющим: относительное ускорение, достигаемое за счет битовой оптимизации, слабо зависит от конкретной модели процессора, поскольку определяется прежде всего разрядностью архитектуры и общими принципами организации памяти, едиными для подавляющего большинства вычислительных устройств, применяемых в информационно-компьютерных системах. Таким образом, полученные результаты репрезентативны для широкого класса платформ.

Программная реализация выполнена на языке *C++*. Для наивного ДП применялся булев массив на основе специализации *std::vector<bool>*. В оптимизированной версии булев массив заменен битовым множеством фиксированного размера. Поскольку вместимость рюкзака принята равной $W = 10^6$, использовалось битовое множество размером $W+1 = 1\,000\,001$ бит (в синтаксисе языка – *std::bitset<1000001>*). Операции сдвига и логического ИЛИ над битовым множеством реализованы встроенными средствами библиотеки. Время выполнения измерялось с помощью *std::chrono::high_resolution_clock*. Каждый эксперимент повторялся пять раз для учета случайных отклонений.

Генерация входных данных выполнялась для трех распределений весов: равномерного, геометрического и гармонического. Выбор обусловлен необходимостью оценить влияние структуры набора предметов на ускорение. Худшие случаи на практике редки, тогда как выбранные распределения охватывают широкий спектр реальных ситуаций. Для каждого распределения генерировалось по 1000 предметов.

Полученные отношения времени выполнения наивной реализации ко времени работы с битовым множеством приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Отношение времени выполнения алгоритмов, мс

Распределение	Запуск 1	Запуск 2	Запуск 3	Запуск 4	Запуск 5	Среднее
Равномерное	16.1	16.6	16.5	17.1	15.6	16.4
Геометрическое	15.3	15.4	15.4	18.5	13.7	15.6
Гармоническое	20.6	21.3	21.1	20.6	21.3	21.0

Выявленное расхождение между теоретическим ускорением в 64 раза и полученными на практике 16-21 разом объясняется совокупностью нескольких факторов, например:

- ограничения, связанные с иерархией памяти: битовое множество размером 125 КБ не помещается в кэш первого уровня, что вызывает задержки при обращениях к памяти;
- накладные расходы реализации битового множества в стандартной библиотеке: дополнительные инструкции для проверки границ и циклической обработки слов;
- межсловные сдвиги: при сдвигах, не кратных 64, возникают переносы битов между машинными словами, требующие дополнительных операций.

Заключение. В ходе экспериментального исследования установлено, что битовая оптимизация ДП для задачи о рюкзаке на основе битовых множеств обеспечивает реальное ускорение от 15,6 до 21,0 раза в зависимости от распределения весов предметов. Это значительно ниже теоретического предела в 64 раза. Основными причинами расхождения являются кэш-промахи при обработке битового множества, которое не помещается в кэш первого уровня, накладные расходы библиотечной реализации, а также дополнительные операции при межсловных сдвигах.

Полученные результаты свидетельствуют о критическом расхождении между теоретической и практической эффективностью: реальный выигрыш в 3-4 раза ниже ожидаемого. При проектировании вычислительных модулей информационно-компьютерных систем опора исключительно на теоретическую оценку ускорения может привести к завышенным ожиданиям и, как следствие, к ошибочному выбору методов оптимизации.

Представленные количественные оценки могут быть использованы разработчиками информационно-компьютерных систем в качестве ориентира при приближенной оценке эффекта от внедрения битовой оптимизации в задачах дискретной оптимизации, подобных задаче о рюкзаке. Результаты работы также подчеркивают важность экспериментальной валидации алгоритмических оптимизаций в контексте реальной вычислительной среды.

Список литературы

1. Окулов С. М., Пестов О. А. Динамическое программирование / С. М. Окулов, О. А. Пестов. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2018. 296 с.
2. Kellerer H., Pferschy U., Pisinger D. Knapsack Problems / H. Kellerer, U. Pferschy, D. Pisinger. 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. 548 p.
3. bitset Class Template Reference [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://gcc.gnu.org/onlinedocs/libstdc++/libstdc++-html-USERS-4.1/classstd__1__1bitset.html. Дата доступа: 12.02.2026.

UDC 004.021:519.857

OPTIMIZATION OF COMPUTATIONAL MODULES IN INFORMATION AND COMPUTER SYSTEMS: A CASE STUDY OF THE KNAPSACK PROBLEM

Markovets R.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Migalevich S.A. – Master of Tech. Sci, senior lecturer at the department of computer science

Annotation. The practical efficiency of bit optimization of dynamic programming for the 0-1 knapsack problem in the context of computational modules of information and computer systems has been experimentally studied. The actual speedup is found to range from 15.6 to 21.0 times depending on the item weight distribution, which is 3-4 times lower than the theoretical speedup limit of 64 times. The main factors contributing to this discrepancy are identified: cache misses during bitset processing, overhead of the library implementation, and cross-word shifts.

Keywords: bitset, knapsack problem, algorithm optimization, practical efficiency, competitive programming, information-computer systems, computational modules

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ НЕЧЕТКОГО СРАВНЕНИЯ СТРОК ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОНЛАЙН- ВИКТОРИН

Лямцев Г.К.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Марков А.Н. – магистр техн. наук, ст. преподаватель кафедры информатики

Аннотация. Сравнительный анализ алгоритмов нечеткого сравнения строк. Исследованы алгоритмы Левенштейна, Дамерау-Левенштейна и Джаро-Винклера. Экспериментально определена зависимость F1-меры от порога принятия решения для каждого алгоритма. Установлено, что алгоритм Дамерау-Левенштейна при пороге не больше 2 символа обеспечивает наилучшую F1-меру 92,9%. Для алгоритмов сходства оптимальным является порог 0,8 для Джаро-Винклера (F1-мера равна 88,8%).

Ключевые слова: нечеткое сравнение, метрики строкового расстояния, расстояние Левенштейна, онлайн-викторины, порог принятия решения, F1-мера.

Введение. Современные информационные системы онлайн-обучения активно используют интерактивные викторины для контроля знаний. Традиционные методы проверки текстовых ответов, основанные на точном совпадении строк, не учитывают естественные опечатки пользователей.

Ключевой задачей при применении алгоритмов нечеткого сравнения является выбор оптимального порога принятия решения. Слишком низкий порог для алгоритмов Левенштейна и Дамерау-Левенштейна приводит к отклонению правильных ответов с незначительными опечатками, а слишком высокий – к принятию неправильных ответов. Необходим баланс между точностью и полнотой распознавания [1].

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа алгоритмов нечеткого сравнения, экспериментальное определение зависимости F1-меры от порога принятия решения и формулирование рекомендаций по выбору оптимального алгоритма и порога для систем онлайн-викторин.

Основная часть. Для сравнительного анализа было рассмотрено 3 алгоритма: расстояние Левенштейна, расстояние Дамерау-Левенштейна и коэффициент Джаро-Винклера.

Расстояние Левенштейна определяется как минимальное количество операций редактирования, необходимых для преобразования одной строки в другую. Алгоритм использует три типа операций с единичной стоимостью: вставка символа, удаление символа и замена одного символа на другой. Для вычисления расстояния строится матрица размером $(m+1) \times (n+1)$, где m и n – длины сравниваемых строк. Каждая ячейка матрицы содержит минимальное расстояние между префиксами строк. Заполнение происходит динамически: для каждой позиции выбирается минимум из трех возможных операций. Вычислительная сложность алгоритма составляет $O(m \times n)$. Ответ считается правильным, если расстояние не превышает заданного порога θ [2].

Расстояние Дамерау-Левенштейна является расширением алгоритма Левенштейна с учетом транспозиции двух соседних символов [3].

Коэффициент Джаро-Винклера представляет собой метрику сходства, возвращающую значение от 0 (полное несовпадение) до 1 (точное совпадение). Алгоритм работает в два этапа. Сначала вычисляется базовая метрика Джаро, которая учитывает количество совпадающих символов и их транспозиции. Символы считаются совпадающими, если они одинаковы и находятся не дальше определенного расстояния друг от друга. Затем применяется модификация Винклера, добавляющая бонус за совпадение начальных символов строк [4].

Для оценки зависимости эффективности алгоритмов от порога принятия решения был сформирован тестовый набор из 500 пар ответа пользователя и правильного ответа, где каждый ответ пользователя помечался либо правильным, либо неправильным. Были

62-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов

включены следующие типы ошибок: опечатки (1-2 символа), транспозиции соседних символов, лишние пробелы и знаки препинания.

В качестве метрик качества использовались:

- Точность – доля правильно принятых ответов среди всех принятых.
- Полнота – доля обнаруженных правильных ответов среди всех правильных.
- F1-мера – гармоническое среднее точности и полноты.

Для каждого алгоритма порог варьировался в следующих диапазонах: для Левенштейна и Дамерау-Левенштейна от 0 до 5 символов, для Джаро-Винклера от 0,60 до 0,90.

Результаты экспериментального исследования зависимости проверяемых метрик от порога для алгоритма Левенштейна представлены в таблице 1:

Таблица 1 – Результаты анализа алгоритма Левенштейна

Порог (символов)	Точность (%)	Полнота (%)	F1-мера (%)
0	100,0	45,0	62,1
1	95,2	72,5	82,3
2	87,3	91,5	89,4
3	78,5	96,8	86,8
4	69,2	98,5	81,3
5	61,5	99,2	75,9

Анализ данных показывает, что оптимум достигается при пороге 2 символа с F1-мерой 89,4%.

Результаты экспериментального исследования зависимости проверяемых метрик от порога для алгоритма Дамерау-Левенштейна представлены в таблице 2:

Таблица 2 – Результаты анализа алгоритма Дамерау-Левенштейна

Порог (символов)	Точность (%)	Полнота (%)	F1-мера (%)
0	100,0	48,5	65,3
1	96,8	78,2	86,5
2	92,1	93,8	92,9
3	84,7	97,5	90,7
4	76,3	98,9	86,1
5	68,5	99,4	81,1

Анализ данных показывает, что оптимум достигается при пороге равном 2 символам с F1-мерой 92,9%, также можем заметить, что алгоритм Дамерау-Левенштейна превосходит базовый алгоритм Левенштейна на всех порогах.

Результаты экспериментального исследования зависимости проверяемых метрик от порога для алгоритма Джаро-Винклера представлены в таблице 3:

Таблица 3 – Результаты анализа алгоритма Джаро-Винклера

Порог сходства	Точность (%)	Полнота (%)	F1-мера (%)
0,60	72,5	96,8	82,9
0,70	80,2	93,2	86,2
0,75	85,8	90,5	88,1
0,80	89,5	88,2	88,8
0,85	93,2	83,5	88,1
0,90	96,5	76,2	85,2

Для алгоритмов сходства зависимость обратная: низкий порог (0,5) дает высокую полноту, но низкую точность. С ростом порога точность увеличивается, а полнота падает. Оптимум для Джаро-Винклера находится в диапазоне 0,75-0,85 с максимальной F1-мерой 88,8% при пороге 0,8.

Анализ результатов показывает, что алгоритм Дамерау-Левенштейна превосходит остальные по F1-мере на всех порогах за счет учета транспозиций соседних символов.

Заключение. Проведен сравнительный анализ трех алгоритмов нечеткого сравнения с экспериментальным определением оптимальных порогов принятия решения. Установлено, что алгоритм Дамерау-Левенштейна показывает наилучшую F1-меру 92,9% при пороге не больше двух символов. Алгоритм Левенштейна достигает F1-меру равную 89,4% при том же пороге, уступая на 3,5% из-за отсутствия учета транспозиций. Джаро-Винклер оптимален при пороге не меньше 0,8 с F1-мерой равной 88,8%.

Для системы онлайн-викторин рекомендуется использовать алгоритм Дамерау-Левенштейна с порогом 2 символа, что обеспечивает оптимальный баланс между точностью (92,1%) и полнотой (93,8%). При необходимости приоритизации точности над полнотой следует увеличить порог до 1 символа (точность 96,8%, полнота 78,2%), при приоритете полноты – снизить до 3 символов (точность 84,7%, полнота 97,5%).

Направлениями дальнейших исследований являются: применение методов машинного обучения для автоматической настройки порогов, интеграция семантического анализа для проверки смысловой близости.

Список литературы

1. *A guided tour to approximate string matching* / G. Navarro // *ACM Computing Surveys*. – 2001. – Vol. 33, N 1. – Pp. 31–88.
2. *Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals* / V.I. Levenshtein // *Soviet Physics Doklady*. – 1966. – Vol. 10, N 8. – Pp. 707–710.
3. *A technique for computer detection and correction of spelling errors* / F.J. Damerau // *Communications of the ACM*. – 1964. – Vol. 7, N 3. – Pp. 171–176.
4. *String Comparator Metrics and Enhanced Decision Rules in the Fellegi-Sunter Model of Record Linkage* / W.E. Winkler // *Proceedings of the Section on Survey Research Methods*. – 1990. – Pp. 354–359.

UDC 004.424.62

COMPARATIVE ANALYSIS OF FUZZY STRING COMPARISON ALGORITHMS FOR AN ONLINE QUIZ INFORMATION SYSTEM

Lyamtsev G.K.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Markov A.N. – Master of Sci. (M. of Sci.), Senior Lecturer at the Department of Informatics

Annotation. A comparative analysis of fuzzy comparison algorithms. The Levenshtein, Damerau-Levenshtein, and Jaro-Winkler algorithms were examined. The dependence of the F1-score on the decision threshold for each algorithm was experimentally determined. It was found that the Damerau-Levenshtein algorithm, with a threshold of no more than two characters, provides the best F1-score of 92.9%. For similarity algorithms, a threshold of 0.8 for the Jaro-Winkler algorithm is optimal (the F1-score is 88.8%).

Keywords: fuzzy comparison, string distance metrics, Levenshtein distance, online quizzes, decision threshold, F1-score.

ИНСТРУМЕНТЫ МОНИТОРИНГА ДИНАМИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Котько Е.Н.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Пискун Е.С. – к.э.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. В статье рассмотрены современные инструменты мониторинга, применяемые для анализа состояния динамических распределённых систем хранения информации. Проведен анализ архитектурных особенностей систем мониторинга, обеспечивающих сбор, обработку и визуализацию данных о функционировании распределённых инфраструктур. Особое внимание уделено инструментам мониторинга, широко используемым в современных информационных системах: Prometheus, Grafana, Zabbix, Elastic Stack, Nagios и Monq. Выполнено сравнение функциональных возможностей данных инструментов, включая методы сбора метрик, анализ логов, визуализацию данных и обработку потоков событий. Представлена сравнительная характеристика рассматриваемых систем мониторинга, позволяющая определить их основные преимущества и области применения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методик сбора и анализа данных, а также при построении систем мониторинга динамических распределённых систем хранения информации.

Ключевые слова: распределённые системы хранения информации, мониторинг систем, сбор метрик, анализ данных, Prometheus, Grafana, Zabbix, Elastic Stack, Nagios, Monq

Введение. С развитием распределённых архитектур существенно возросла роль инструментов мониторинга, обеспечивающих сбор метрик, анализ логов и визуализацию данных. Актуальной задачей является анализ существующих решений и оценка их применимости для динамических распределённых систем хранения информации.

Целью данной работы является анализ современных инструментов мониторинга распределённых систем и определение их возможностей для организации мониторинга процессов в динамических распределённых системах хранения информации.

Основная часть. Мониторинг распределённых систем представляет собой процесс непрерывного наблюдения за состоянием компонентов системы с целью получения информации о её функционировании. В распределённых системах мониторинг должен обеспечивать сбор данных с большого числа узлов, обработку значительных объёмов информации и оперативное выявление отклонений в работе системы.

Основными задачами мониторинга распределённых систем являются:

- сбор метрик, характеризующих состояние вычислительных ресурсов;
- анализ производительности приложений и сервисов;
- обнаружение отказов и аномалий;
- прогнозирование возможных сбоев;
- визуализация и анализ полученных данных.

Для решения этих задач используются специализированные программные средства, которые обеспечивают автоматизацию процессов сбора и обработки данных, интеграцию с различными источниками и масштабируемость инфраструктуры. Современные инструменты мониторинга можно классифицировать следующим образом:

- сбор и хранение метрик: Prometheus, Monq;
- визуализация и аналитика: Grafana;
- мониторинг инфраструктуры и сервисов: Zabbix, Nagios;
- анализ логов и событий: Elastic Stack.

Классификация демонстрирует основные функциональные направления развития современных систем мониторинга.

В распределённых информационных системах применяются инструменты с различной архитектурой и набором функций. Для наглядного представления наиболее распространённых решений на рисунке 1 показано распределение используемых инструментов мониторинга в распределённых информационных системах.

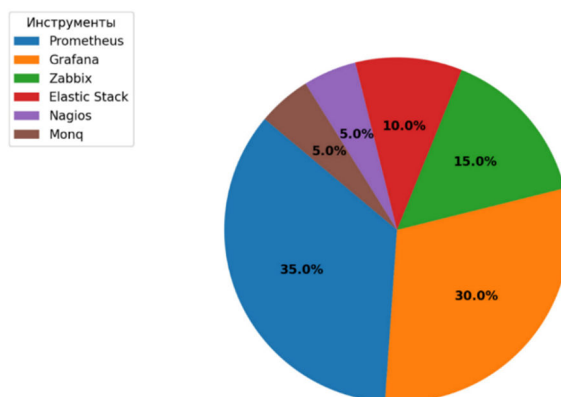


Рисунок 1 – Диаграмма распределения распространённых инструментов мониторинга

Рассмотрим наиболее популярные инструменты мониторинга, применяемые для анализа состояния распределённых систем хранения информации.

Prometheus – система мониторинга временных рядов, предназначенная для контроля распределённых и облачных систем. Основой работы является pull-модель, при которой сервер периодически опрашивает источники данных, что обеспечивает централизованное управление сбором метрик и упрощает масштабирование. Prometheus поддерживает язык запросов PromQL, позволяющий выполнять аналитические операции, агрегировать метрики и выявлять аномалии. Интеграция с системами визуализации и оповещений позволяет фиксировать сбои и обеспечивать своевременное реагирование на изменение состояния инфраструктуры. Высокая производительность и поддержка контейнеризированных и микросервисных архитектур делают Prometheus эффективным инструментом мониторинга масштабных распределённых систем [1].

Grafana – инструмент визуализации и аналитики данных мониторинга, позволяющий создавать настраиваемые интерактивные дашборды и объединять метрики, логи и события из различных источников, включая Prometheus, Zabbix, Elastic Stack и Monq, в единое визуальное пространство. Платформа предоставляет средства построения графиков, таблиц, тепловых карт и других компонентов для отображения динамики нагрузки и использования ресурсов. Гибкая настройка панелей, поддержка шаблонов и интеграция с системами оповещений обеспечивают оперативное реагирование на критические события и повышение эффективности управления распределённой инфраструктурой [2].

Zabbix – комплексная система мониторинга корпоративной и распределённой инфраструктуры, предназначенная для контроля серверов, сетевых устройств, баз данных и приложений. Архитектура поддерживает агентский и безагентский сбор данных, что позволяет осуществлять наблюдение за большим количеством узлов с минимальной нагрузкой на сеть. Система обеспечивает контроль сервисов, анализ логов, автоматическое обнаружение ресурсов и настройку уведомлений. Zabbix также предоставляет средства построения отчётов и прогнозирования потенциальных сбоев, что делает её эффективной для динамически изменяющихся инфраструктур [3].

Elastic Stack (Elasticsearch, Logstash, Kibana, Beats) – платформа для централизованного сбора, хранения и анализа логов и событий, предназначенная для контроля распределённых информационных систем. Система обеспечивает агрегирование данных из различных источников, корреляцию событий и выявление аномалий. Kibana отвечает за визуализацию и построение аналитических панелей, Logstash выполняет обработку данных, а Beats собирает

события с узлов инфраструктуры. Elastic Stack эффективно используется для диагностики проблем и анализа производительности в высоконагруженных средах [4].

Nagios – система мониторинга доступности серверов, сетевых устройств и приложений. Благодаря модульной архитектуре и поддержке плагинов её можно адаптировать под различные задачи и интегрировать с другими инструментами мониторинга. Система фиксирует состояние сервисов, собирает метрики и формирует уведомления о сбоях, обеспечивая непрерывный контроль инфраструктуры. Надёжность и простота внедрения делают Nagios востребованным инструментом в корпоративных и гетерогенных средах [5].

Monq – система обработки потоков данных, предназначенная для объединения метрик, логов и событий из различных источников, включая Prometheus, Zabbix и Elastic Stack. Платформа позволяет выполнять аналитические операции в реальном времени, включая выявление аномалий и корреляцию событий. Поддержка предиктивного анализа и моделирования нагрузок позволяет прогнозировать потенциальные сбои и повышать устойчивость распределённых сервисов. Обработка больших потоков данных обеспечивает комплексный анализ инфраструктуры и сокращение времени простоя [6].

Рассмотренные системы мониторинга демонстрируют широкий спектр функциональных возможностей и архитектурных решений. Prometheus и Monq обеспечивают сбор и анализ метрик в реальном времени, Grafana ориентирована на визуализацию данных, Zabbix и Nagios предоставляют контроль состояния инфраструктуры, а Elastic Stack – масштабируемую обработку логов. Совместное использование данных инструментов позволяет формировать комплексные решения для мониторинга распределённых систем, обеспечивая отслеживание состояния инфраструктуры и минимизацию времени простоя критически важных сервисов. Для наглядного сравнения ключевых характеристик и функциональных особенностей указанных инструментов представлена таблица 1.

Таблица 1 – Сравнение инструментов мониторинга

Инструмент	Тип инструмента	Основное назначение	Ключевые особенности
Prometheus	Метрики	Сбор и хранение временных рядов	Pull-мониторинг, язык запросов PromQL, интеграция с оповещениями
Grafana	Визуализация	Дашборды и аналитика	Интерактивные панели, интеграция с множеством источников данных
Инструмент	Тип инструмента	Основное назначение	Ключевые особенности
Zabbix	Инфраструктура	Мониторинг серверов и приложений	Агентная архитектура, контроль сетевых протоколов, система оповещений
Elastic Stack	Логи	Анализ событий и логов	Обработка больших объёмов данных, диагностика проблем и взаимосвязей событий
Nagios	Инфраструктура	Контроль доступности сервисов	Модульная архитектура, поддержка большого числа плагинов, гибкая настройка
Monq	Потоки данных	Аналитика потоков метрик	Высокая производительность при потоковой обработке, выявление аномалий и корреляция метрик

Таблица 1 демонстрирует ключевые различия между современными инструментами мониторинга, отражая их функциональную направленность и особенности архитектуры. На основании представленных характеристик можно сделать вывод: выбор конкретного инструмента зависит от типа мониторинга, объёма обрабатываемых данных и требований к визуализации и аналитике.

Заключение. Анализ современных инструментов мониторинга распределённых систем показал разнообразие методов обработки данных: сбор метрик временных рядов, анализ логов и событий, визуализацию и потоковую обработку информации. Применение инструментов обеспечивает комплексный контроль инфраструктуры, своевременное выявление отказов, оценку производительности и обнаружение аномалий.

Сравнительный анализ функциональных возможностей инструментов мониторинга демонстрирует, что максимальная эффективность достигается при интеграции различных технологий, объединяющих сбор метрик, анализ событий и визуализацию данных. Такой

подход повышает точность мониторинга и обеспечивает глубокий аналитический обзор состояния распределённых систем.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки методик сбора и обработки данных, проектирования систем мониторинга динамических распределённых систем хранения информации и построения высоконагруженных информационных инфраструктур с повышенной надёжностью и устойчивостью.

Список литературы

1. Запускаем PROMETHEUS. Мониторинг инфраструктуры и приложений / Пивотто Ж., Бразил Б. // ДМК Пресс. – Москва, 2023.
2. Grafana: приборная панель проекта. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://skillbox.ru/media/code/grafana-pribornaya-panel-proekta/> – Дата доступа: 10.03.2026.
3. Zabbix 7: мониторинг ИТ-инфраструктуры / Н. Лифтинг, Б. ван Бакел // Sprint Book. – 2025. – 512 с.
4. Активное выявление угроз с Elastic Stack / Пуз Э. // ДМК Пресс. – 2022. – Москва.
5. Nagios Documentation. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.nagios.org/documentation/> – Дата доступа: 10.03.2026.
6. Документация Monq. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.monq.io/docs/> – Дата доступа 10.03.2026.

UDC 004.65:004.75

MONITORING TOOLS FOR DYNAMIC DISTRIBUTED STORAGE SYSTEMS

Katsko E.N.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Piskun E.S. – Cand. Econ. Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. This paper examines modern monitoring tools used for analyzing the state of dynamic distributed storage systems. The architectural features of monitoring systems that enable the collection, processing, and visualization of data on the operation of distributed infrastructures are analyzed. Special attention is given to monitoring tools widely utilized in contemporary information systems, including Prometheus, Grafana, Zabbix, Elastic Stack, Nagios, and Monq. The functional capabilities of these tools are compared, covering metrics collection methods, log analysis, data visualization, and event stream processing. A comparative characterization of the reviewed monitoring systems is provided, highlighting their main advantages and areas of application. The results can be used in the development of methodologies for data collection and analysis, as well as in the design of monitoring systems for dynamic distributed storage infrastructures.

Keywords: distributed storage systems, system monitoring, metrics collection, data analysis, Prometheus, Grafana, Zabbix, Elastic Stack, Nagios, Monq

МОДЕЛИ И АРХИТЕКТУРЫ ДИНАМИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Котько Е.Н.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Пискун Е.С. – к.э.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. В статье проведён системный анализ архитектур и моделей динамических распределённых систем хранения информации (ДРСХИ), включая Master-Slave, Peer-to-Peer, шардированные и гибридные модели. Рассмотрены ключевые алгоритмы распределения данных и обеспечения согласованности (Consistent Hashing, Distributed Hash Tables, Quorum-протоколы) и их влияние на масштабируемость, отказоустойчивость и нагрузку на узлы. Показано, что гибридные модели, сочетающие мастер-репликацию и динамическое шардирование, обеспечивают оптимальный баланс между производительностью и согласованностью, снижая перераспределение данных на 20-30 % при росте числа узлов с 50 до 500 и поддерживая стабильную телеметрию. Полученные результаты демонстрируют эффективность комплексного подхода к проектированию ДРСХИ для высоконагруженных динамических распределённых систем.

Ключевые слова: динамические распределённые системы, архитектуры Master-Slave/P2P/шардирование, Consistent Hashing, Distributed Hash Tables, Quorum, масштабируемость, отказоустойчивость, телеметрия

Введение. Современные динамические распределённые системы хранения информации (ДРСХИ) обеспечивают масштабируемость, отказоустойчивость и обработку больших объёмов данных [1]. Эффективность работы системы определяется архитектурой узлов и алгоритмами распределения данных, которые задают маршрутизацию, согласованность и баланс нагрузки. Основные архитектурные модели – Master-Slave, Peer-to-Peer и шардированные схемы – обладают различными характеристиками по управлению данными и отказоустойчивости. Гибридные модели, объединяющие элементы этих подходов, позволяют сохранять согласованность и минимизировать нагрузку на узлы. Алгоритмы Consistent Hashing, Distributed Hash Tables и Quorum-протоколы снижают перераспределение данных и повышают доступность информации [2,3]. Цель работы – системный анализ архитектур и алгоритмов ДРСХИ с оценкой масштабируемости, отказоустойчивости и эффективности телеметрии. Задачи включают классификацию архитектур, исследование алгоритмов распределения и согласованности, анализ масштабируемости и выявление оптимальных решений для высоконагруженных динамических распределённых систем.

Основная часть. Архитектура динамических распределённых систем хранения информации (ДРСХИ) определяет структуру узлов, их роли и способы взаимодействия, что напрямую влияет на масштабируемость, отказоустойчивость и распределение нагрузки.

В модели Master-Slave центральный узел (master) управляет операциями записи и синхронизацией реплик, а реплики обрабатывают операции чтения. Такая структура упрощает управление согласованностью, однако узел-мастер становится узким местом при росте числа узлов свыше сотни, что ограничивает масштабируемость [2,5].

В Peer-to-Peer (P2P) архитектуре все узлы равноправны, выполняют чтение и запись, участвуют в маршрутизации и хранении данных. Отсутствие централизованного узла повышает отказоустойчивость и позволяет равномерно распределять нагрузку по кластеру, сохраняя высокую доступность при динамическом изменении числа узлов [3].

Шардирование разделяет глобальное пространство данных на независимые сегменты (shards), распределяемые между узлами. Каждый узел хранит лишь часть данных, что снижает нагрузку, повышает параллелизм обработки запросов и масштабируемость. При росте числа

узлов с 50 до 500 количество операций репликации снижается на 30 %, а среднее время отклика остаётся стабильным [3].

Гибридные модели объединяют элементы Master-Slave, P2P и шардирования. Например, внутри сегмента реализуется мастер-реплика, а сегменты взаимодействуют как равноправные узлы P2P. Такой подход обеспечивает баланс между производительностью, согласованностью и масштабируемостью до тысяч узлов без деградации системы [3,5].

Архитектуры моделей представлены на рисунке 1.

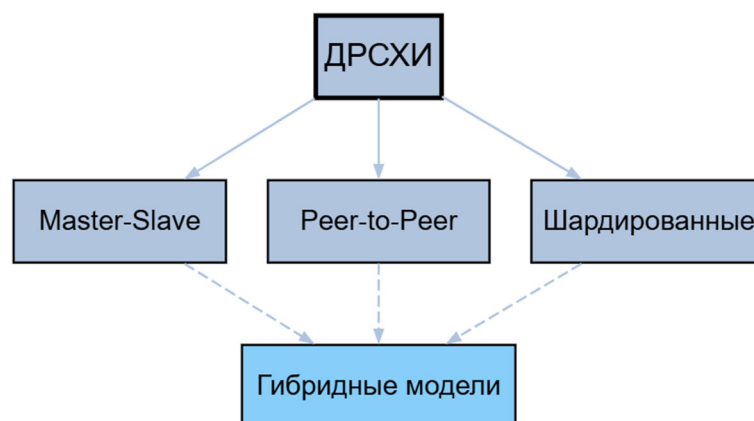


Рисунок 1 – Схема архитектур моделей ДРСХИ

Схема демонстрирует иерархическую структуру и взаимосвязь архитектурных моделей ДРСХИ. Центральный элемент «ДРСХИ» отражает всю систему в целом. Три ветви представляют базовые модели Master Slave, Peer to Peer и шардированную с различиями в функциях узлов и способах управления данными. Гибридная модель объединяет преимущества всех трёх подходов, обеспечивая масштабируемость, отказоустойчивость и равномерное распределение нагрузки в кластере.

Архитектура задаёт структуру системы и распределяет роли узлов, однако эффективность работы ДРСХИ определяется алгоритмами распределения данных и обеспечения согласованности. Distributed Hash Tables (DHT) обеспечивают логарифмический поиск и хранение данных в P2P-сетях, распределяя ключи по узлам. Это позволяет масштабировать систему до тысяч узлов без центрального контроллера и снижает вероятность потери данных при отказах до 0,05 %. Consistent Hashing минимизирует перераспределение данных при добавлении или удалении узлов: перераспределяется только локальный сегмент хеш-пространства. При увеличении узлов с 50 до 500 перераспределение данных снижается на 20–30 %, что критично для поддержания доступности информации. Quorum-схемы повышают согласованность, требуя подтверждения операций чтения/записи от заданного числа узлов. В системах с 200 узлами вероятность неконсистентного чтения снижается до 0,01 %, даже при отказе 30 % узлов [4].

Архитектуры и алгоритмы взаимосвязаны: архитектура задаёт физическую и логическую структуру узлов, а алгоритмы реализуют её функциональное поведение. Комбинирование подходящей архитектуры с эффективными алгоритмами DHT, Consistent Hashing и Quorum обеспечивает масштабируемость, отказоустойчивость и согласованность данных, снижает нагрузку на узлы и сеть, а также поддерживает высокую доступность информации при динамическом росте кластера.

Реальная эффективность динамических распределённых систем хранения информации оценивается через метрики телеметрии и перераспределения данных. При увеличении числа узлов с 10 до 500 наблюдается линейный рост телеметрических показателей: метрики/с

увеличиваются с 500 до 26 000, объём телеметрии – с 5 до 240 МБ/мин, что представлено на рисунке 2.

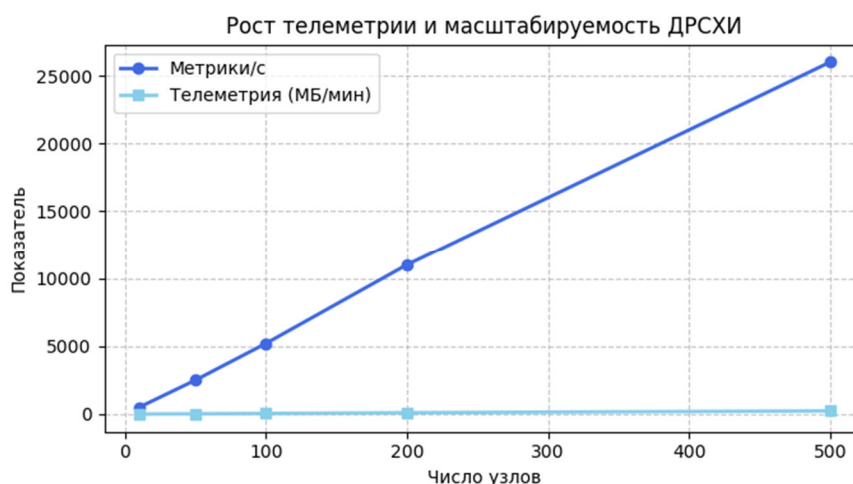


Рисунок 2 – График телеметрии и масштабируемости ДРСХИ

Схема отражает, как увеличение числа узлов напрямую влияет на объём телеметрических данных и нагрузку на сеть. Это позволяет выявлять потенциальные узкие места и планировать оптимизацию распределения данных.

Алгоритмы Consistent Hashing и гибридные модели снижают избыточные операции репликации. При росте числа узлов с 50 до 500 перераспределение данных уменьшается на 20–30 %, что критично для поддержания высокой доступности. В гибридных системах с шардированием и мастер-репликой внутри сегмента можно масштабироваться до 1000 и более узлов, снижая вероятность отказа отдельных узлов на 15-20 %, что представлено на рисунке 3.



Рисунок 3 – График перераспределения данных при увеличении числа узлов

График демонстрирует, как Consistent Hashing и гибридные подходы сохраняют стабильность системы при динамическом росте кластера.

Заключение. Эффективность динамических распределённых систем хранения информации определяется интеграцией продуманной архитектуры и алгоритмов распределения данных. Выбор оптимальной комбинации моделей и протоколов обеспечивает баланс между масштабируемостью, отказоустойчивостью и согласованностью, снижает избыточную репликацию и поддерживает высокую доступность при росте числа узлов и объёма данных. Результаты анализа показывают, что гибридные модели с

мастером-репликацией и динамическим шардированием являются наиболее перспективными для высоконагруженных распределённых систем, формируя эффективную динамическую распределённую систему хранения информации.

Список литературы

1. Таненбаум Э., ван Стин М. Распределённые системы. Принципы и парадигмы / Э. Таненбаум, М. ван Стин. – СПб. : Питер, 2014. – 960 с. – ISBN 978-5-496-00663-9.
2. Петров А. Распределённые данные. Алгоритмы работы современных систем хранения информации / А. Петров. – СПб. : Питер, 2020. – 432 с. – ISBN 978-5-4461-1640-9.
3. Клеппман М. Высоконагруженные приложения. Программирование, масштабирование, поддержка / М. Клеппман. – СПб. : Питер, 2013. – 688 с. – ISBN 978-5-496-00520-5.
4. Ермакин А.А. Метод анализа и тестирования распределённых информационных систем, построенных с использованием серверов приложений // Современные технологии: Сборник научных статей / Под ред. С.А. Козлова и В.О. Никифорова. СПб: СПбГИТУ (ТУ), 2002. – С. 186-197.
5. Остроух А. В., Суркова Н. Е. Распределённые информационные системы / А. В. Остроух, Н. Е. Суркова. – М. : Юрайт, 2022. – 352 с. – ISBN 978-5-534-08680-5.

UDC 004.65:004.75:004.052

MODELS AND ARCHITECTURES OF DYNAMIC DISTRIBUTED STORAGE SYSTEMS

Katsko E.N.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Piskun E.S. – Cand. Econ. Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. This paper presents a systematic analysis of the architectures and models of dynamic distributed storage systems (DDSS), including Master-Slave, Peer-to-Peer, sharded, and hybrid models. Key data distribution and consistency algorithms (Consistent Hashing, Distributed Hash Tables, Quorum protocols) and their impact on scalability, fault tolerance, and node load are examined. It is shown that hybrid models, combining master-replication and dynamic sharding, provide an optimal balance between performance and consistency, reducing data redistribution by 20–30 % when the number of nodes grows from 50 to 500, while maintaining stable telemetry. The results demonstrate the effectiveness of an integrated approach to designing DDSS for high-load dynamic distributed systems.

Keywords: dynamic distributed systems, Master-Slave/P2P/sharding architectures, Consistent Hashing, Distributed Hash Tables, Quorum, scalability, fault tolerance, telemetry

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СМАРТФОНОВ: АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Яромченко А.Г

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Пискун Г.А. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Проведен анализ современных методов охлаждения смартфонов, включая пассивные и активные технологии. Особое внимание уделено инновационной системы жидкостного охлаждения AquaCore Cooling System, применяемой в игровом смартфоне RedMagic 11 Pro, обеспечивающая циркуляцию фторированной жидкости и снижение температуры без шума и вибраций. Рассмотрены основные компоненты системы: активный вентилятор, пьезоэлектрическая микропомпа, испарительная камера. Проанализированы преимущества технологий в контексте высокопроизводительно процессора Snapdragon 8 Elite Gen 5 и их влияние на стабильность FPS в играх без троттлинга. Предложены перспективы развития, включая Heat Pass Block от Samsung.

Ключевые слова: пьезоэлектрическая микропомпа, испарительная камера, жидкостное охлаждение, охлаждение смартфонов, паровая камера, троттлинг, AquaCore Cooling System, Heat Pass Block.

Введение. Постоянный рост производительности мобильных процессоров, достигаемый за счет увеличения количества ядер и тактовых частот, приводит к пропорциональному росту тепловыделения. Традиционные пассивные системы на основе графитовых пластин перестают справляться с отводом тепла, что приводит к возникновению троттлинга – вынужденное снижение тактовой частоты для предотвращения перегрева. Это негативно сказывается на производительности.

В данной статье автором показано, что применение инновационных систем охлаждения позволяет не только снизить предельные температуры, но и обеспечить стабильную производительность при длительных нагрузках.

Основная часть. Современные системы охлаждения смартфонов делятся на две категории:

- активные;
- пассивные.

К пассивным технология охлаждения относятся: паровые камеры и графеновые пленки. Паровая камера представляет собой плоскую трубу или трубопровод, в котором находится жидкость (рисунок 1). Она может испаряться, а затем легко конденсироваться. Жидкость поглощает тепло от источника и становится паром. Этот пар попадает в более холодные части камеры, где конденсируются и отдает поглощенное тепло. После перехода в жидкую форму химическое вещество возвращается в исходное положение и повторяет цикл. Это повторяется до тех пор, пока тепло не будет равномерно распределено по всей камере [6]. Графеновые пленки обладают теплопроводностью до 5000 Вт/(м·К), что в 10-12 раз выше, чем у меди (385 Вт/(м·К)). Стоит отметить, что получение данного материала в промышленных масштабах пока задача невыполнимая, поэтому чаще используют восстановленный оксид графена. Материал обладает худшей теплопроводностью по сравнению с графеном до 500-900 Вт/(м·К).



Рисунок 1– Паровая камера смартфона

К активным технологиям охлаждения относятся: микровентиляторы и системы жидкостного охлаждения. Микровентиляторы гонят холодный воздух из внешней среды через теплораспределительную пластину процессора и выводят наружу, однако имеют недостаток в виде шума и механического износа. Стоимость такой технологии примерно равно стоимости паровых камер, однако эффективность выше. Инновационная система жидкостного охлаждения AquaCore Cooling System, реализованная в смартфоне RedMagic 11 Pro. Это первая массовая система, реализующая активную циркуляцию жидкости внутри смартфона. Система представляет собой двухканальную конструкцию, сочетающую жидкостное и воздушное охлаждение. Процесс терморегуляции включает в себя три этапа:

1. Теплопоглощение. Тепло от процессора Snapdragon 8 Elite Gen 5 отводится с помощью композита Liquid Metal 3.0 (жидкий металл), обеспечивающий улучшенную теплопроводность в сравнении с термопастой [1].

2. Теплопередача и циркуляция. Ключевым элементом системы является крошечная керамическая микропомпа. Сама помпа изготовлена из пьезокерамики, прокачивает охлаждающую жидкость по внутренним каналам, вырезанные лазером на микронном уровне для обеспечения плавного потока жидкости (рисунок 2). В качестве теплоносителя используется фторированная жидкость, класса антифриза, работающая в экстремальных температурах от -40°C до $+70^{\circ}\text{C}$ [3]. Циркулируя жидкость отводит тепло к радиатору с воздушным охлаждением.

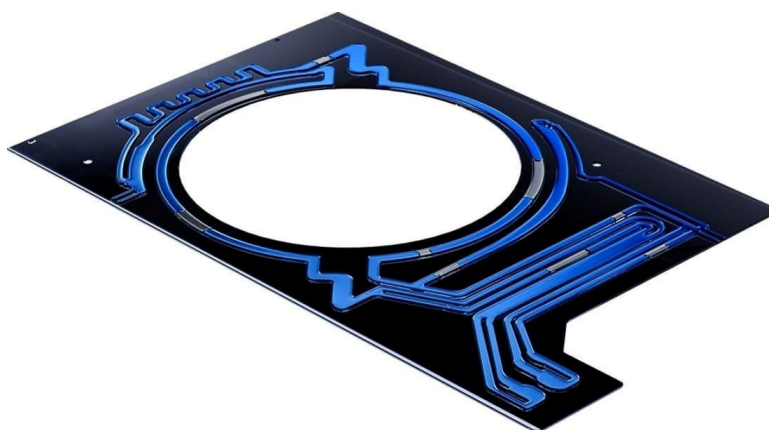


Рисунок 2 – Контур системы охлаждения

3. Теплоотвод. На конечном этапе вступает вентилятор, вращающиеся со скоростью 24000 об/мин [1]. Вентилятор продувает воздух через специальные воздуховоды, выводя тепло за пределы корпуса.

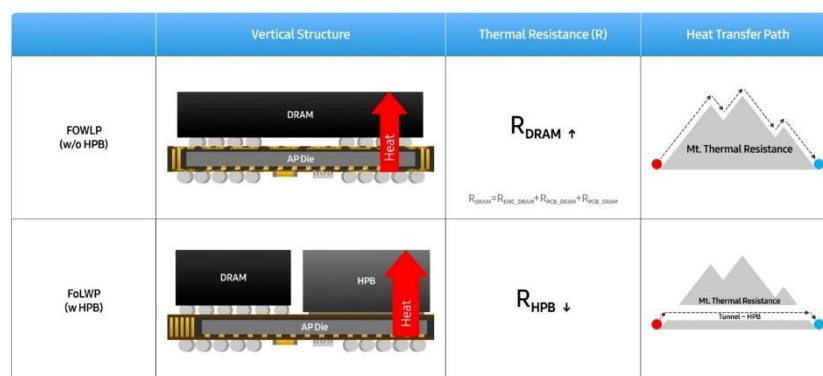
AquaCore Cooling System обеспечивает снижение температуры чипа до 10°C под нагрузкой по сравнению с пассивными система охлаждения, что позволяет полностью

исключить троттлинг. Это подтверждается практическими тестами (таблица 1). На данный момент данная технология является самой дорогой в реализации, однако эффективность данной технологии значительно выше, чем у других. Так что этот недостаток скрывается.

Таблица 1 – Сравнительная эффективность систем охлаждения

Параметр	iPhone 17 Pro Max(пассивная)	RedMagic 11 Pro (AquaCore)
Средний FPS в играх	59,6	60,9
Просадки FPS	6,5	0,5
Потребление заряда батареи, %	49	27

Следующим этапом развития охлаждения может стать технология Samsung Heat Pass Block, которая реализована в новом процессоре от Samsung Exynos 2600 и возможно уже появится во второй половине 2026 года. Технология представляет собой специальный теплоотводящий блок, который устанавливается непосредственно на кристалл процессора. В традиционных схемах чип памяти (DRAM) располагается прямо над процессором, создавая «тепловую ловушку» [2]. Чип памяти (DRAM) был перемещен таким образом, чтобы он больше не перекрывал основную область, генерирующую тепло. Затем HPB, способный быстро передавать тепло, был размещен непосредственно над источником тепла для обеспечения более эффективного рассеивания тепла и снижения термического сопротивления. Это дает возможность процессорам достигать частот вплоть до 5 ГГц, что ранее было недостижимо для мобильных устройств без экстремального охлаждения. Главным преимуществом внедрения HPB станет отказ от активных систем охлаждения – кулеров. Данная технология занимает промежуточное место по стоимости среди всех.



Ы

Рисунок 3 – Архитектура технология Heat Pass Block (HPB)

Заключение. Выполнен сравнительный анализ современных методов охлаждения смартфонов, классифицированных на пассивные и активные технологии. Установлено, что использование традиционных пассивных систем, несмотря на использование материалов с высокой теплопроводностью, достигают предела эффективности при длительных пиковых нагрузках, что приводит к неизбежному троттлингу. Детально рассмотрена инновационная система жидкостного охлаждения AquaCore Cooling System и процесс терморегуляции, используемая в игровом смартфоне RedMagic 11 Pro. Анализ показал, что применение гибридной двухканальной системы AquaCore позволяет снизить температуру процессора до 10°C под нагрузкой по сравнению с пассивными аналогами. Это позволяет снизить энергопотребление на 22%, значительно уменьшить просадки FPS. В качестве перспективного направления определена технология Heat Pass Block от Samsung. Данное решение предполагает изменение архитектуры чипа на кристаллическом уровне за счет выноса DRAM-

модулей из области процессора и установки медного теплблока непосредственно над источником тепла.

Список литературы

1. REDMAGIC 11 Pro: Official Product Page [Electronic resource]. – Access mode: <https://global.redmagic.gg/pages/redmagic-11-pro>. – Access date: 25.02.2026.
2. Samsung Exynos 2600 и технология Heat Pass Block (HPB): новое слово в охлаждении мобильных процессоров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://abit.ee/ru/hardware/processors/samsung-exynos-2600-heat-pass-block-hpb-processor-cooling-qualcomm-mediatek-mobile-chips-soc-heat-di-ru>. – Дата доступа: 25.02.2026.
3. Red Magic 11 Pro: флагманский игровой смартфон с жидкостным охлаждением [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ixbt.com/news/2025/10/16/red-magic-11-pro.html>. – Дата доступа: 25.02.2026.
4. Какие бывают виды охлаждения в смартфоне [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://club.dns-shop.ru/blog/t-78-smartfonyi/143047-kakie-byivaut-vidyi-ohlazhdeniya-v-smartfone/>. – Дата доступа: 25.02.2026.
5. Samsung HPB и Exynos 2600: прорыв в охлаждении мобильных чипов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ixbt.com/news/2026/02/14/samsung-hpb-exynos-2600.html>. – Дата доступа: 25.02.2026.
6. Что такое паровое охлаждение и как оно используется в смартфонах: раскрываем секреты вашего гаджета [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.techinsider.ru/gadgets/1549353-cto-takoe-parovoe-ohlazhdenie-i-kak-ono-ispolzuetsya-v-smartfonah/>. Дата доступа 25.02.2026.

UDC 621.396.6.04-71

MODERN METHODS OF COOLING SMARTPHONES: ANALYSIS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Yaromchenko A.G.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Piskun G.A. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. This article analyzes modern smartphone cooling methods, including passive and active technologies. Particular attention is paid to the innovative AquaCore Cooling System, used in the RedMagic 11 Pro gaming smartphone, which circulates fluorinated liquid and reduces temperatures without noise or vibration. The main system components are discussed: an active fan, a piezoelectric micropump, and a vapor chamber. The advantages of these technologies are analyzed in the context of the high-performance Snapdragon 8 Elite Gen 5 processor and their impact on FPS stability in games without throttling. Future developments are proposed, including Samsung's Heat Pass Block.

Keywords: piezoelectric micro pump, evaporation chamber, liquid cooling, smartphone cooling, vapor chamber, throttling, AquaCore Cooling System, Heat Pass Block.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ КОМПЬЮТЕРНОГО ГЕНЕРИРОВАНИЯ СТАНДАРТНЫХ РАВНОМЕРНЫХ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

Алексеев С.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Боровиков С.М. – к. т. н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований по определению для различных алгоритмов количества стандартных равномерных псевдослучайных чисел, входящих в совокупность (период) до начала повторения значений этих чисел. Разработан программный комплекс на языке Python, реализующий методы анализа периодов: полный перебор, алгоритм Брента и статистический анализ. Проведено тестирование восьми классических алгоритмов генерирования псевдослучайных чисел, даны рекомендации по использованию алгоритмов.

Ключевые слова: стандартные равномерные псевдослучайные числа, алгоритмы генерирования случайных чисел, период повторения чисел

Введение. Статистическое моделирование выходных параметров и эксплуатационных свойств электронных устройств (ЭУ) основано на получении реализаций случайных параметров с использованием генераторов псевдослучайных чисел. Важной характеристикой является длина последовательности (периода), определяющая количество чисел до начала повторения. При моделировании, требующем сотен тысяч или миллионов реализаций (например, в методах Монте-Карло), недостаточная длина периода может приводить к корреляциям и искажению результатов. Поэтому актуальной задачей является выбор алгоритма генерации псевдослучайных чисел с учётом требуемого объёма данных, производительности и достоверности моделирования ЭУ.

Целью работы является экспериментальное исследование периодов классических и современных алгоритмов генерации равномерных псевдослучайных чисел, разработка методики их тестирования и формулировка рекомендаций по выбору генератора для задач, требующих большого числа реализаций.

Основная часть. При выполнении исследований использованы научные работы [1–4]. Для проведения исследования был разработан программный комплекс на языке Python, включающий проверку восьми классических алгоритмов различных битностей: Middle-Square (1946), LCG-8bit (1949), LCG-16bit (1969), Xorshift-16 (2003), LCG-22bit (1986), LCG-24bit (1986), Xorshift-32 (2003), Xorshift-64 (2003). Для анализа периодов использовались три следующие метода:

- 1 Полный перебор (для алгоритмов с периодом ≤ 65 тыс. случайных чисел).
- 2 Алгоритм Брента (для периодов ≤ 100 млн случайных чисел) [1].
- 3 Статистический анализ на выборке 1 млн чисел (для периодов > 4 млрд. случайных чисел).

Эксперименты проводились, используя компьютер с процессором Intel Core i7-12700K. Время выполнения одного теста ограничивалось 30-ю секундами. Результаты тестирования (таблица 1) показали, что для классических алгоритмов с правильно подобранными параметрами (LCG-8bit, LCG-16bit, LCG-22bit, LCG-24bit) экспериментально полученные периоды полностью соответствуют теоретическим. В то же время алгоритм Middle-Square продемонстрировал период всего в 56 значений вместо примерно теоретически возможных 10 000, что подтверждает ограниченность его использования для важных инженерных задач.

Таблица 1 – Экспериментальные результаты тестирования классических алгоритмов

Алгоритм	Количество неповторяющихся случайных чисел в периоде:		Метод определения количества случайных чисел в периоде
	теоретический подход	определено экспериментально	
1 Middle-Square	~10 000	56	Полный перебор
2 LCG-8bit	256	256	Полный перебор
3 LCG-16bit	65536	65536	Полный перебор
4 Xorshift-16	65535	65535	Полный перебор
5 LCG-22bit	4194304	4194304	Алгоритм Брента
6 LCG-24bit	16777216	16777216	Алгоритм Брента
7 Xorshift-32	$4,29 \times 10^9$	Статистический тест продолжительностью 30 секунд	Статистический
8 Xorshift-64	$1,8 \times 10^{19}$	Статистический тест продолжительностью 30 секунд	Статистический

Для современных алгоритмов (PCG32, Xoroshiro128+, Philox, ChaCha20 и др.) период настолько велик ($10^{19} \dots 10^{27}$), что его прямой поиск методами Брента или перебора физически невозможен. Поэтому для их оценки применялись статистические тесты.

По вычислительной сложности и скорости генерации современные алгоритмы можно разделить на следующие категории:

1 Сверхбыстрые алгоритмы (1...3 такта на число).

К ним относятся Xoroshiro128+ [2] и WyRand. Благодаря оптимизированной структуре, они требуют всего 1...3 такта процессора на генерацию одного числа, что делает их идеальными для задач, требующих максимальной производительности (игровая логика, компьютерная графика и т.п.).

2 Алгоритмы средней сложности (5...15 тактов на число).

В эту группу входят PCG32 и Philox. PCG32 комбинирует быстрый линейный конгруэнтный шаг с дополнительной битовой перестановкой, что улучшает статистические свойства [3] ценой увеличения сложности до 5–10 тактов на число. Philox использует несколько раундов умножения и XOR для обеспечения параллелизма, что требует 10...15 тактов. Эти алгоритмы предлагают оптимальный баланс между скоростью и качеством случайных чисел, подходят для научных расчётов и моделирования.

3 Сложные криптографические алгоритмы (20...60 тактов на число).

ChaCha20 и AES-CTR относятся к этой категории. Они выполняют множественные раунды преобразований (сложения, вращения, подстановки) для обеспечения криптографической стойкости, что увеличивает сложность до 20...60 тактов на число. Хотя их скорость существенно ниже, они гарантируют, что выходная последовательность практически неотличима от истинно случайной. Ниже приводятся рекомендации по выбору алгоритма генерирования псевдослучайных чисел.

1 Для учебных целей и маломасштабных симуляций (до 50...100 тыс. реализаций) достаточно классических алгоритмов с периодом порядка $10^6 \dots 10^7$, таких как LCG-24bit или Xorshift-32. Их период может быть проверен экспериментально за приемлемое время, а скорость генерации составляет 5...10 тактов на число.

2 Для производственных задач моделирования (от 100 тыс. до миллиардов реализаций) следует выбирать современные алгоритмы с гарантированно бóльшим периодом и проверенными статистическими свойствами:

а) PCG32, обеспечивает баланс скорости 5...10 тактов на число и высокое качество распределения, период $\sim 1,8 \times 10^{19}$;

б) Philox, является идеальным для параллельных вычислений, обеспечивает детерминированную генерацию на каждом ядре/узле, период $\sim 3,4 \times 10^{38}$.

3 Для криптографических задач или моделирования с повышенными требованиями к безопасности следует использовать специализированные алгоритмы: ChaCha20 или AES-CTR. Их сложность выше (20...60 тактов на число), но они обеспечивают криптографическую стойкость и надёжность.

4 Для задач, где скорость генерации критична, а требования к криптостойкости отсутствуют, можно использовать WyRand или Xoroshiro128+ (1...3 такта на число).

5 При выборе алгоритма необходимо убедиться, что его период существенно (минимум на порядок) превышает требуемое количество генерируемых чисел. Для проверки качества генерации следует применять статистические тестовые наборы. Также важно учитывать разрядность случайных чисел: малые разрядности (64...128 бит) подходят для встраиваемых систем, большие (512+ бит) – для криптографии и высоконадёжных приложений.

Заключение. Проведённое исследование подтвердило, что для задач моделирования с большим числом реализаций необходимы алгоритмы с достаточной длиной периода, приемлемой вычислительной сложностью и подтверждёнными статистическими характеристиками. Классические алгоритмы с малыми периодами пригодны в основном для учебных целей. Современные генераторы (PCG, Xoroshiro, Philox) обеспечивают необходимую длину периода и производительность, а криптографические алгоритмы (ChaCha20, AES-CTR) – повышенную надёжность. Разработанная методика тестирования позволяет оценивать пригодность генераторов и избегать ошибок, связанных с повторением псевдослучайных чисел.

Список литературы

1. Brent, R.P. An improved Monte Carlo factorization algorithm / R.P. Brent // *BIT Numerical Mathematics*. – 1980. – Vol. 20, N 2. – Pp. 176–184.
2. L'Ecuyer, P. TestU01: A C Library for Empirical Testing of Random Number Generators / P. L'Ecuyer, R. Simard // *ACM Transactions on Mathematical Software*. – 2007. – Vol. 33, N 4. – Article 22.
3. Vigna, S. An experimental exploration of Marsaglia's xorshift generators, scrambled / S. Vigna // *ACM Transactions on Mathematical Software*. – 2016. – Vol. 42, N 4. – Article 30.
4. O'Neill, M.E. PCG: A Family of Simple Fast Space-Efficient Statistically Good Algorithms for Random Number Generation / M.E. O'Neill // *Technical Report, Harvey Mudd College*. – 2014. – 58 p.

UDC 004.421.5

STUDY OF ALGORITHMS FOR COMPUTER GENERATION OF STANDARD PSEUDORANDOM NUMBERS WITH UNIFORM DISTRIBUTION

Alekseev S.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Borovikov S.M. – Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor of the Department of ICSD

Annotation. The article presents the results of experimental studies to determine, for various algorithms, the number of standard, uniformly distributed pseudorandom numbers included in a set (period) before the values of these numbers begin to repeat. A Python software package has been developed that implements period analysis methods: exhaustive search, Brent's algorithm, and statistical analysis. Eight classical pseudorandom number generation algorithms have been tested, and recommendations for their use are provided.

Keywords: Standard uniformly distributed pseudo-random numbers, random number generation algorithms, number repetition period

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВОГО СЕРВИСА «МОБИЛЬНЫЙ КАБИНЕТ АБОНЕНТА» ДЛЯ СФЕРЫ ЖКХ

Чехомов Е.Г.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Лихачевский Д.В. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Разработано распределенное программное средство «Мобильный кабинет абонента» для содействия государственной программе «Цифровая Беларусь» [1]. Внедрение сервиса позволяет автоматизировать передачу показаний приборов учета и оплату услуг. Проведен анализ эффективности, показавший сокращение времени обработки данных на 65% по сравнению с традиционными методами. Предложена методика функционального контроля программных блоков, основанная на модульном тестировании REST-сервиса.

Ключевые слова: мобильный кабинет, ЖКХ, REST API, JSON, автоматизация, распределенные системы.

Введение. В соответствии с утвержденной государственной программой «Цифровая Беларусь» на 2026–2030 годы, повышение уровня цифровизации во всех сферах экономики, в частности в жилищно-коммунальном хозяйстве (далее ЖКХ), является приоритетной задачей для Республики Беларусь [1]. Типичные методы взаимодействия с абонентами характеризуются высокой трудоемкостью и подверженностью «человеческому фактору». Согласно данным статистических сборников, ручной ввод данных при обработке квитанций жилищно-коммунальных услуг (далее ЖКУ) сопряжен с возникновением ошибок в 3–5% случаев, что требует внедрения автоматизированных систем [2]. Актуальность работы заключается в создании кроссплатформенного сервиса, сводящего к минимуму временные издержки абонента и оператора.

Основная часть. Для достижения установленной цели была спроектирована распределенная система из серверной части и клиентского приложения. Данный подход обеспечивает независимость логики обработки данных от визуального представления. Для чистоты реализации и обеспечения полноты тестирования система разделена на две области (рисунок 1):

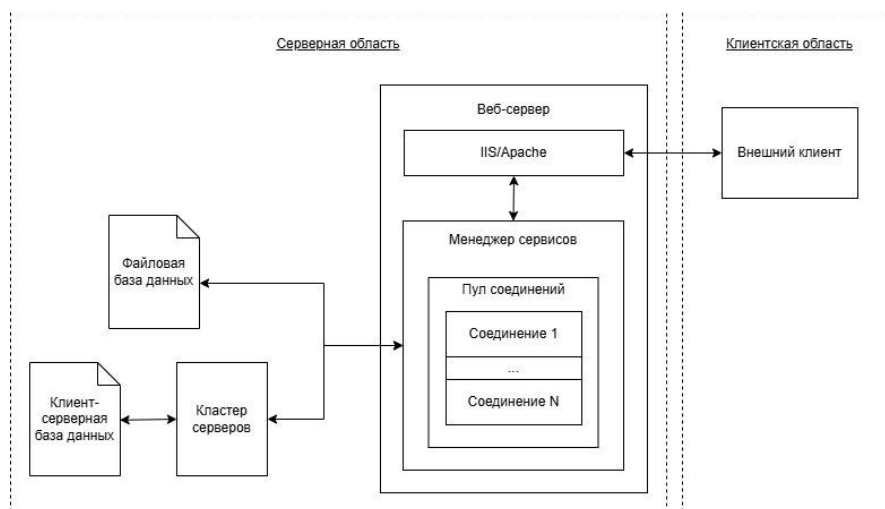


Рисунок 1 – Структурная схема распределенного программного комплекса «Мобильный кабинет абонента»

Серверная часть реализована в архитектуре REST, что позволяет обеспечивать обмен данными в формате JSON между базой данных жилищно-коммунального хозяйства и

мобильным клиентом. Клиентская часть отвечает исключительно за визуализацию данных. Для обеспечения полноты тестирования программное средство было представлено в виде функциональных блоков (далее ФБ), соответствующих узлам распределенной архитектуры. Разработанный набор тестовых программ (далее ТП) обеспечивает последовательность тестирования ФБ в составе системы (таблица 1):

Таблица 1 – Последовательность тестирования функциональных блоков программного средства

№ тестовой программы	Область тестирования
ТП1	проверка авторизации и генерации JWT-токена
ТП2	проверка корректности записи показаний приборов учета
ТП3	нагрузочное тестирование при массовой онлайн-оплате услуг абонентами

Таким образом, общий алгоритм функционирования программного средства при обработке транзакций абонента (передача показаний или оплата) можно представить следующим образом (рисунок 2).

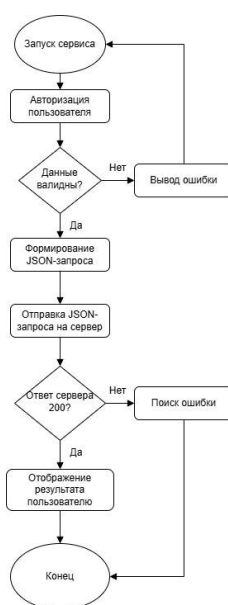


Рисунок 2 – Алгоритм функционирования мобильного сервиса и обработки запросов

Контроль корректной работы функциональных блоков осуществляется на каждом этапе выполнения алгоритма. После прохождения этапа авторизации на стороне клиента (мобильного приложения) формируется JSON-запрос, который передается через веб-сервер к пулу соединений базы данных. При возникновении ошибки валидации на любом из этапов цикл прерывается с возвратом информационного сообщения пользователю.

Вероятность безотказной обработки запросов абонентов ($P_{\text{безотк}}$) при пиковых нагрузках на распределенную систему рассчитывается по формуле 1:

$$P_{\text{безотк}} = \exp(-\lambda \cdot t) \cdot 100\% \quad (1)$$

где λ – интенсивность поступления запросов, содержащих ошибки валидации или тайм-ауты соединения;

t – среднее время сеанса связи клиента с сервером, мс.

Снижение скорости отклика или отказ в обслуживании (в терминах программной инженерии) обусловлены спецификой организации пула соединений клиент-серверной базы данных (см. рис. 1). Данный модуль исследуемой системы обладает ограниченным количеством одновременных подключений, что делает его самым уязвимым узлом в моменты пиковой активности абонентов.

Введение строгой предварительной валидации данных на стороне мобильного клиента (до отправки запроса на сервер) позволяет существенно снизить нагрузку на кластер серверов. Полученные результаты показывают высокую эффективность применения REST-архитектуры и формата JSON для обеспечения отказоустойчивости программных средств в сфере ЖКХ.

Заключение. Выполнен анализ процесса информационного взаимодействия абонентов с расчетными центрами ЖКХ. Установлено, что применение распределенной архитектуры клиент-сервер (на базе REST API) с выделенным пулом соединений позволяет минимизировать риски отказа в обслуживании в моменты пиковых нагрузок. Определено, что предварительная валидация вводимых значений строго на стороне мобильного клиента существенно снижает нагрузку на кластер серверов и исключает попадание некорректных данных в биллинговую базу.

Предложен алгоритм функционирования программного средства, обеспечивающий высокую отказоустойчивость обработки транзакций. Использование разработанного цифрового сервиса сокращает временные затраты абонентов на совершение типовых операций (передача показаний, оплата) в среднем на 60–65 % (с 15 до 3 минут). Разработанная система полностью удовлетворяет актуальным требованиям к безопасности (шифрование, токенизация) и соответствует нормам законодательства Республики Беларусь в сфере защиты персональных данных.

Список литературы

1. Цифровая Беларусь. Какие задачи планируется решить за следующие пять лет? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pravo.by/novosti/obshchestvenno-politicheskie-i-v-oblasti-prava/2025/december/91694/>. Дата доступа: 06.03.2026.
2. Информационное общество в Республике Беларусь: стат. сб. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2025. 186 с.
3. О защите персональных данных: Закон Респ. Беларусь от 7 мая 2021 г. № 99-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: <https://pravo.by>. Дата доступа: 06.03.2026.
4. Fielding, R. T. *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures* / R. T. Fielding. University of California, Irvine, 2000.
5. ГОСТ ISO/IEC 12207-2010. Информационная технология. Системная и программная инженерия. Процессы жизненного цикла программных средств. Минск: Госстандарт, 2011.
6. OWASP Mobile Top 10 Risks [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://owasp.org/www-project-mobile-top-10/>. Дата доступа: 06.03.2026.

UDC 004.9:332.8

SOFTWARE TOOL FOR IMPLEMENTING THE DIGITAL SERVICE «MOBILE SUBSCRIBER ACCOUNT» FOR HOUSING AND COMMUNAL SERVICES

Chechomov Y.G.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Likhachevsky D.V. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. A distributed software tool «Mobile Subscriber Account» has been developed to support the state program «Digital Belarus» [1]. The implementation of the service allows automating the transmission of meter readings and payment for services. An efficiency analysis was conducted, showing a 65% reduction in data processing time compared to traditional methods. A methodology for functional control of software blocks based on modular testing of the REST service is proposed.

Keywords: mobile account, housing and communal services, REST API, JSON, automation, distributed systems.

ROI АВТОМАТИЗАЦИИ: ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ

Кондратенко Е.В., Шиш П.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Коваленко И.В. – магистр экономических наук, ст. преподаватель кафедры ПИКС

Аннотация. Рассматривается задача оценки целесообразности внедрения автоматизированного тестирования в учебное веб-приложение для коммерческой библиотеки. Предложена экономико-математическая модель расчета точки окупаемости (*break-even point*) и *ROI* автоматизации, учитывающая временные и инвестиционные затраты на ручное тестирование и разработку автотестов с настройкой инфраструктуры, а также экономический эффект от сокращения времени регрессионной проверки и частичного снижения стоимости дефектов за счет более раннего обнаружения.

Ключевые слова: ручное тестирование, автоматизация тестирования, *Java*, *Spring Boot*, *JUnit*, интеграционное тестирование, *Jenkins*, точка окупаемости, *ROI*

Введение. В качестве объекта исследования рассматривается курсовой проект «Аналитическое приложение для автоматизации учета новых поступлений и мониторинга выдачи-возврата книг читателями в библиотеке» с клиент-серверной архитектурой в виде *REST API*-сервиса. Контейнерный уровень проекта содержит *frontend*-часть (*HTML5*, *CSS*, *TypeScript*, *Bootstrap*, *Angular*) и *backeng*-часть (*Java*, *Spring Boot*, *PostgreSQL*).

Для тестирования: *Windows 11* (x64), *JDK 17*, *Apache Maven*, *Spring Boot Starter Test*, *Maven Surefire Plugin 3.2.5* (запуск модульных тестов), *JaCoCo Maven Plugin 0.8.9* (анализ покрытия кода тестами), *Maven Checkstyle Plugin 3.3.1* (проверка соответствия кода стандартам), *Jenkins* (автоматический запуск сборки, тестов и проверок качества кода), *Docker* и *Docker Compose* (развертывание тестовой среды и сервисов базы данных).

В данной статье авторы представляют результаты эксперимента в формате «до» и «после» внедрения автотестов и настройки окружения. Измерения фиксировались на одинаковом наборе регрессионных сценариев и одинаковом аппаратном (*CI*-окружении), чтобы сравнение отражало именно вклад автоматизации.

Основная часть. Для оценки тестового покрытия кода серверной части приложения использовалась *JaCoCo* – специализированная библиотека покрытия кода, разработанная командой *EclEmma* [1]. Для большинства компонентов проекта показатель покрытия находится в диапазоне 85-100 %, а общее покрытие инструкций по системе составило 91 %.

Для оценки экономической эффективности автоматизации тестирования используется показатель *ROI* (*Return on Investment*) – отношение полученной выгоды к затратам на внедрение [2]. Показатель рассчитывается по формуле 1:

$$ROI = \frac{B-C}{C} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где *B* – суммарные выгоды (*benefits*);

C – суммарные затраты (*cost*).

В рамках проекта рассматривалась автоматизация регрессионного тестирования серверной части приложения. В качестве выгоды учитывалась экономия времени выполнения тестов, а затратами – трудозатраты на разработку тестов и их поддержку.

Пусть задан период анализа – год, и определены:

– *r* – стоимость одного человеко-часа (руб./ч) для работ по тестированию/разработке (включая налоги и накладные);

- N – число регрессионных прогонов за период;
 - t_{man} – средняя длительность одного ручного прогона регрессии (включая подготовку окружения и выполнение);
 - t_{auto} – длительность одного автоматизированного прогона (включая запуск и минимальный анализ результатов);
 - t_{maint} – средние трудозатраты поддержки автотестов на один цикл (например, на релиз/спринт);
 - T_{init} – трудозатраты разработки автотестов и инфраструктуры (часы).
- Экономический эффект от сокращения «ручного» труда вычисляется по формуле 2:

$$B = N \cdot \Delta t \cdot r. \quad (2)$$

Тогда суммарные затраты вычисляются по формуле 3:

$$C = T_{init} \cdot r + N \cdot t_{maint} \cdot r. \quad (3)$$

В ходе работы с проектом получены следующие значения:

- ручной прогон: подготовка окружения и данных $t_{env} = 0,42$ ч и прохождение сценариев $t_{exec} = 2,00$ ч, $t_{man} = 2,42$ ч;
 - автоматизированный прогон: старт контейнера БД и запуск интеграционных, API-тестов 0,25 ч и анализ отчета, логов 0,10 ч, $t_{auto} = 0,35$ ч;
 - поддержка автотестов на цикл $t_{maint} = 0,40$ ч (корректировка тестов при изменении API, валидаций, ролей);
 - стоимость часа $r = 45$ руб./ч;
 - одноразовые трудозатраты на внедрение (T_{init}) приняты 60 ч (настройка тестовой архитектуры, написание набора *unit* и интеграционных тестов, интеграция в CI).
- Экономия времени на каждом цикле вычислена по формуле 4:

$$\Delta t = t_{man} - t_{auto} = 2,42 - 0,35 = 2,07 \text{ ч.} \quad (4)$$

Накопленная чистая выгода на один цикл рассчитана по формуле 5:

$$g = (\Delta t - t_{maint}) \cdot r = (2,07 - 0,40) \cdot 45 = 75,15 \text{ руб.} \quad (5)$$

Начальные затраты на внедрение автоматизации вычислена по формуле 6:

$$T_{init} \cdot r = 60 \cdot 45 = 2700 \text{ руб.} \quad (6)$$

Точка окупаемости по числу циклов регрессии вычислена по формуле 7:

$$N^* = \frac{T_{init} \cdot r + C_{tool}}{g} = \frac{2700}{75,15} \approx 36 \text{ циклов.} \quad (7)$$

Интерпретация рассчитанного показателя критически зависит от частоты регрессий, поскольку фактор «как часто тест нужно запускать» выделяется как ключевой критерий целесообразности автоматизации: чем больше релизов (циклов), тем выше выгода от автоматизации регрессии [3].

Рассмотрим два режима эксплуатации:

- 1 При редких прогонах (1 регрессия в месяц $N = 12$).
- 2 При частых прогонах (1 регрессия в неделю, $N = 52$).

Используя формулы выше получены значения для представленных ситуаций, включая *ROI* (таблица 1):

Таблица 1 – Сравнительный анализ показателей *ROI* автоматизации тестирования для различных режимов регрессионного тестирования

Показатель	Режим А: $N = 12$	Режим В: $N = 52$
Выгода по времени B	1117,8 руб.	4843,8 руб.
Затраты на поддержку $N \cdot t_{maint} \cdot r$	216 руб.	936 руб.
Общие затраты C	2916 руб.	3636 руб.
<i>ROI</i> по времени	-61,7 %	+33,2 %

Исходя из полученного значения при редких прогонах регрессии автоматизация может не окупиться на годовом горизонте; при частых прогонах – становится экономически целесообразной (положительный *ROI*, достижение точки окупаемости приблизительно на 36-м цикле).

Заключение. Проведенные расчеты показателей *ROI* и точки безубыточности показали, что автоматизация тестирования требует больших начальных трудозатрат по сравнению с ручным тестированием. Однако при дальнейшем использовании автоматизированные тесты позволяют заметно снизить затраты на выполнение повторных регрессионных проверок. При редком запуске регрессии автоматизация может не окупиться в пределах годового периода. Экономическая эффективность автоматизации напрямую зависит от того, как часто выполняются регрессионные проверки и насколько активно развивается программный продукт. Предложенная модель расчета может применяться при планировании тестирования в аналогичных проектах на базе *Spring*.

Список литературы

1. Отчеты о покрытии кода JUnit тестами с помощью Maven плагина JaCoCo [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/591553/>. Дата доступа: 03.03.2026.
2. What Is Return on Investment (ROI) and How to Calculate It [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.investopedia.com/terms/r/returnoninvestment.asp>. Дата доступа: 03.03.2026.
3. Automation Testing [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.guru99.com/automation-testing.html>. Дата доступа: 05.03.2026.

UDC 004.415.538

ROI OF AUTOMATION: ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODEL OF FEASIBILITY

Kondratenko E.V., Shish P.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Kovalenko I.V. – head of the Department of Innovative Developments in Education, Master of Sci. (M. of Sci.),
Senior Lecturer at the Department of ICSD

Annotation. The task of assessing the feasibility of implementing automated testing in an academic web application for a commercial library is considered. An economic and mathematical model for calculating the break-even point and ROI of automation is proposed, taking into account the time and investment costs of manual testing and development of autotests with infrastructure configuration, as well as the economic effect of reducing the time of regression testing and partially reducing the cost of defects due to earlier detection.

Keywords: manual testing, test automation, Java, Spring Boot, JUnit, integration testing, Jenkins, break-even point, ROI

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ДОСТУПНОСТИ КАК ЧАСТЬ ПРОЦЕССА РАЗРАБОТКИ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ

Концевая В.Д., Толстенков И.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Коваленко И.В. – магистр экономических наук, ст. преподаватель кафедры ПИКС

Аннотация. В статье рассматривается практический подход к автоматизации тестирования доступности веб-приложений. Описана интеграция инструментов *eslint-plugin-jsx-a11y*, *jest-axe* и *GitHub Actions* в процесс разработки *React*-приложений. Проведён эксперимент с демонстрационным приложением, позволивший выявить типичные нарушения требований доступности.

Ключевые слова: доступность веб-приложений, *accessibility testing*, автоматизация тестирования, *React*, *CI/CD*.

Введение. Доступность веб-приложений является важным требованием при разработке современных цифровых сервисов. Она обеспечивает возможность использования информационных систем различными категориями пользователей, включая людей с ограниченными возможностями. В Республике Беларусь необходимость обеспечения доступности информационных ресурсов закреплена рядом нормативных документов, в частности Законом «О социальной защите инвалидов в Республике Беларусь» и Законом «Об информации, информатизации и защите информации» [1]. На практике проблемы доступности часто выявляются только на этапе тестирования интерфейса. Это усложняет исправление ошибок и увеличивает затраты на разработку. В связи с этим актуальной задачей является внедрение автоматизированных инструментов проверки доступности непосредственно в процесс разработки. Целью работы является демонстрация практического подхода к автоматизации тестирования доступности веб-приложений.

Основная часть. Автоматизация тестирования доступности предполагает использование инструментов, позволяющих анализировать интерфейс на разных этапах разработки. В рамках исследования использовались следующие инструменты:

- *eslint-plugin-jsx-a11y* – плагин для линтера *ESLint*, выполняющий статический анализ *JSX*-разметки и выявляющий нарушения требований доступности [2];
- *jest-axe* – библиотека для автоматического анализа *DOM*-структуры после рендеринга компонентов;
- *GitHub Actions* – инструмент *CI/CD* для автоматического запуска проверок.

Совместное использование этих инструментов позволяет обнаруживать ошибки доступности как на этапе написания кода, так и при выполнении тестов.

Процесс автоматизированного тестирования доступности пользовательского интерфейса включает последовательность этапов, представленных ниже:

1 Статический анализ исходного кода компонентов с использованием *ESLint* и плагина *eslint-plugin-jsx-a11y*.

2 Выявление типичных нарушений доступности (отсутствие *alt* у изображений, отсутствие *label* у элементов формы, использование несемантических *HTML*-элементов).

3 Рендеринг компонентов в тестовой среде при помощи библиотеки *React Testing Library*.

4 Анализ сформированного *DOM*-дерева с использованием библиотеки *jest-axe*, основанной на движке *axe-core* [3].

5 Формирование отчёта о найденных нарушениях доступности.

6 Автоматический запуск проверок в *CI/CD*-пайплайне при каждом изменении кода.

Для демонстрации работы инструментов было создано тестовое *React*-приложение, содержащее несколько компонентов пользовательского интерфейса.

Пример компонента, содержащего нарушения доступности:

```
export default function BadCard() {
  return (
    <div onClick={() => alert(«Clicked!»)}>
      <img src=«/image.png» />
      <h2>Card title</h2>
    </div>
  );
}
```

В данном примере изображение не содержит альтернативного текста, а элемент *div* используется как интерактивный элемент. Такие решения ухудшают доступность интерфейса. При запуске проверки на ошибки выводится отчет об ошибках (рисунок 1).

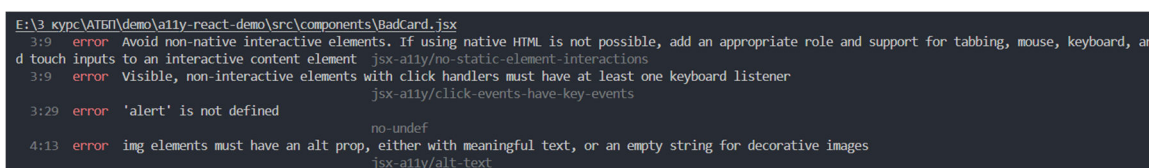
A screenshot of a terminal window showing ESLint error messages for a file named BadCard.jsx. The errors are listed with line numbers and rule names. The errors are: 3:9 error Avoid non-native interactive elements. If using native HTML is not possible, add an appropriate role and support for tabbing, mouse, keyboard, and touch inputs to an interactive content element (jsx-ally/no-static-element-interactions); 3:9 error Visible, non-interactive elements with click handlers must have at least one keyboard listener (jsx-ally/click-events-have-key-events); 3:29 error 'alert' is not defined (no-undef); 4:13 error img elements must have an alt prop, either with meaningful text, or an empty string for decorative images (jsx-ally/alt-text).

Рисунок 1 – Отчет об ошибках (*eslint-plugin-jsx-ally*)

Для автоматической проверки доступности используется библиотека *jest-axe*, которая анализирует *DOM* после рендеринга компонентов [3].

Пример тестового сценария:

```
import { render } from «@testing-library/react»;
import { axe, toHaveNoViolations } from «jest-axe»;
import App from «../App»;
expect.extend(toHaveNoViolations);
test(«App accessibility test», async () => {
  const { container } = render(<App />);
  const results = await axe(container);
  expect(results).toHaveNoViolations();
});
```

При обнаружении нарушений тест завершается со статусом *failed* и выводит отчёт об ошибках (рисунок 2).

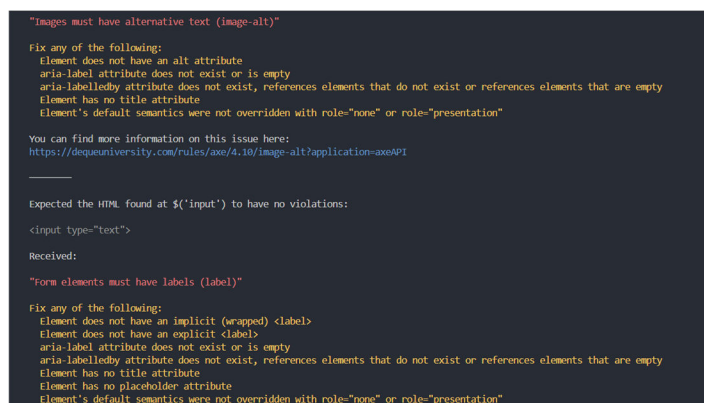
A screenshot of a terminal window showing the output of a Jest-axe accessibility test. The output includes a title "Images must have alternative text (image-alt)", a list of violations, a link to the axe rules documentation, and a detailed description of the violations found in the HTML. The violations are: "Form elements must have labels (label)".

Рисунок 2 – Отчёт об ошибках (*jest-axe*)

Для автоматизации проверки был настроен *CI/CD*-пайплайн с использованием платформы *GitHub Actions* [4]. При каждом изменении кода выполняются установка зависимостей, запуск линтера и выполнение тестов доступности.

В ходе экспериментального применения предложенного подхода было протестировано демонстрационное *React*-приложение, содержащее несколько интерфейсных компонентов (карточки, формы ввода и кнопки взаимодействия). На начальном этапе анализа статический анализатор выявил несколько типичных нарушений доступности, включая отсутствие альтернативного текста у изображений и использование несемантических *HTML*-элементов для обработки пользовательских действий. Дополнительный анализ *DOM*-структуры при помощи библиотеки *jest-axe* обнаружил нарушения, связанные с отсутствием подписей у элементов формы. После исправления выявленных проблем повторный запуск тестов показал отсутствие нарушений доступности и успешное прохождение *CI/CD*-проверки.

Заключение. В работе продемонстрирован практический подход к автоматизации тестирования доступности веб-приложений. Использование инструментов *eslint-plugin-jsx-a11y*, *jest-axe* и *GitHub Actions* позволяет выявлять нарушения требований доступности на ранних этапах разработки. Результаты эксперимента показали, что интеграция автоматических проверок в процесс разработки повышает качество пользовательских интерфейсов и снижает вероятность появления регрессионных ошибок. Интеграция автоматизированных проверок доступности в процесс разработки позволяет разработчикам получать обратную связь о проблемах интерфейса непосредственно во время разработки. Это снижает вероятность появления ошибок доступности на поздних этапах проекта и уменьшает затраты на их исправление. Кроме того, автоматические проверки в *CI/CD*-пайплайне предотвращают повторное появление ранее исправленных дефектов, что повышает стабильность интерфейса и упрощает сопровождение проекта.

Список литературы

1. Закон Республики Беларусь «О социальной защите инвалидов в Республике Беларусь». – Минск, 1991.
2. *eslint-plugin-jsx-a11y Documentation* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/jsx-eslint/eslint-plugin-jsx-a11y>. – Дата доступа: 05.03.2026.
3. *axe-core Documentation* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/dequelabs/axe-core>. – Дата доступа: 05.03.2026.
4. *GitHub Actions Documentation* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.github.com/actions>. – Дата доступа: 05.03.2026.

UDC 004.415.533

AUTOMATION OF ACCESSIBILITY TESTING AS PART OF THE WEB APPLICATION DEVELOPMENT PROCESS

Kontsevaya V.D., Tolstenkov I.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Scientific supervisor: Kovalenko I.V. – Master of Economics, Senior Lecturer at the Department of ICSD

Annotation. The article describes a practical approach to automating accessibility testing during web application development. The integration of *eslint-plugin-jsx-a11y*, *jest-axe* and *GitHub Actions* into the development workflow of *React* applications is considered. An algorithm for automated accessibility testing is presented, including static code analysis and *DOM* testing. The experiment with a demo application revealed typical accessibility issues and demonstrated the effectiveness of automated checks.

Keywords: accessibility testing, web accessibility, test automation, *React*, *CI/CD*.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ РАБОЧЕГО МЕСТА СПЕЦИАЛИСТА ОТДЕЛА СТАЖИРОВОК IT-КОМПАНИИ НА ОСНОВЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА ФУНКЦИОНАЛА СИСТЕМ КЛАССА TMS

Косович П.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Пискун Е.С. – к.э.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. В статье проведен сравнительный анализ систем класса TMS применительно к специфике IT-стажировок. На основе выявленных недостатков решений предложен проект программного средства автоматизации рабочего места специалиста, которое позволяет собирать результаты работы стажеров в единый цифровой профиль для принятия объективных, основанных на данных решений о трудоустройстве стажера в штат компании.

Ключевые слова: IT-стажировка, автоматизированное рабочее место, Talent Management System (TMS), матрица компетенций, принятие решений о найме, дорожная карта, менторство, мониторинг

Введение. IT-стажировка представляет собой интенсивный образовательный процесс под руководством технических экспертов (менторов), нацеленный на оперативное усвоение компетенций, необходимых для выполнения конкретных должностных обязанностей [1]. Основным барьером на пути к эффективному управлению стажировками является «функциональный разрыв» между модулем обучения и процедурой принятия управленческого решения о найме в существующих информационных решениях. Целью данной статьи является проведение сравнительного анализа функционала систем класса Talent Management System (TMS) и проектирование на основе выявленных недостатков программного средства автоматизации рабочего места специалиста, обеспечивающего эффективный мониторинг и объективный анализ результатов процесса стажировки.

Основная часть. Процесс проведения стажировок в IT-индустрии характеризуется высокой интенсивностью информационного обмена и активным вовлечением в обучение менторов. Согласно данным аналитического агентства Smart Ranking, лидерами белорусского и СНГ сегмента HRTech, чей функционал в области развития и онбординга персонала наиболее применим к задачам управления процессом IT-стажировок, являются программные решения Mirapolis HCM, Potok и Websoft HCM [2].

Для обоснования проектирования программного средства проведено исследование данных аналогов в контексте их применимости для управления процессом стажировки (таблица 1) [3,4,5]:

Таблица 1 – Функциональный обзор TMS аналогов

Критерий	Mirapolis HCM	Potok	Websoft HCM
Формирование цифрового профиля достижений стажеров	Нет	Нет	Нет
Визуализация дорожных карт	Нет	Да	Да
Дифференциация теоретических и практических модулей обучения	Да	Нет	Да
Отслеживание прогресса развития стажеров по навыкам	Да	Нет	Да
Сбор оценок и обратной связи от менторов	Да	Да	Да
Расчет рейтинга стажера	Нет	Нет	Нет
Управление нагрузкой менторов	Да	Да	Нет
Напоминания о дедлайнах по выполнению и проверке задач	Нет	Да	Да
Конструктор программ стажировок на основе типовых модулей	Да	Нет	Нет
Генерация отчетов для принятия решений о найме	Нет	Нет	Нет

На основании анализа таблицы 1 выявлено существование явного «функционального разрыва» между этапом мониторинга обучения и процедурой принятия решения о найме. В

универсальных TMS-решениях, таких как Mirapolis HCM, Potok, процесс стажировки зачастую рассматривается как упрощенный вариант адаптации сотрудника, где контроль усвоения профессиональных компетенций стажера заменяется формальными чек-листами. Более гибкие системы, такие как Websoft HCM, требуют трудоемкой настройки и перегружены избыточными модулями, что снижает оперативность работы менторов и специалистов в условиях данного вида стажировки.

Главным недостатком аналогов является отсутствие механизмов автоматического накопления достижений в рамках единого цифрового профиля стажера. Данные о результатах выполненных заданий и промежуточных ассессментов существуют обособленно и не обеспечивают комплексную оценку успешности кандидата. В результате, на этапе принятия итогового решения глава отдела вынужден полагаться на субъективные мнения, не подтвержденные объективной историей профессионального развития.

С целью устранения данных недостатков спроектировано программное средство автоматизации рабочего места специалиста отдела стажировок IT-компаний. Диаграмма вариантов использования наглядно отображает базовые пользовательские требования, предъявляемые к программному средству (рисунок 1).

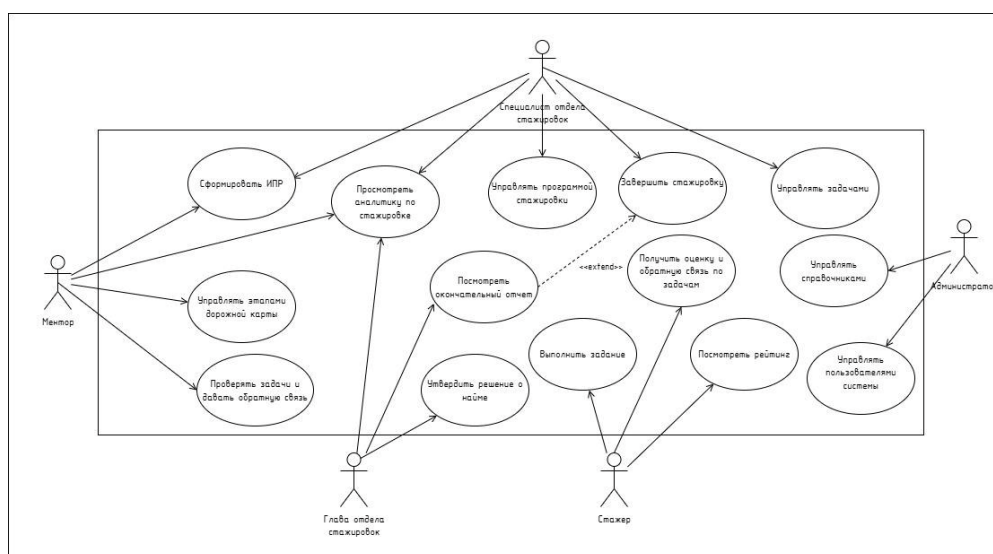


Рисунок 1 – Диаграмма вариантов использования

Диаграмма вариантов использования, представленная на рисунке 1, отражает комплексный подход к управлению жизненным циклом IT-стажировки. Ключевой инновационной составляющей проектируемого программного средства является механизм автоматической агрегации данных.

В отличие от существующих TMS-систем, где данные об обучении и результаты оценки часто разобщены, данное решение базируется на создании единого цифрового профиля стажера. В системе реализована сквозная связь: каждое действие в рамках дорожной карты (например, выполнение задачи, прохождение ассессмента) автоматически конвертируется в измеримые показатели компетенций. Такой подход позволяет трансформировать процесс завершения стажировки из субъективного одобрения в объективную процедуру, основанную на данных, исключая человеческий фактор при принятии решения о найме.

Реализация данной концепции обеспечивается через ролевую модель, адаптированную под уникальные процессы IT-компаний:

1 Специалист отдела стажировок выступает основным координатором процесса. Его функциональные возможности включают управление программами и профилями стажировок, формирование индивидуальных планов развития, контроль соблюдения дедлайнов и мониторинг общей аналитики по всем активным потокам обучения.

2 Ментор обеспечивает экспертное сопровождение процесса. В рамках системы ментор наполняет этапы дорожных карт материалами и практическими задачами, осуществляет проверку выполненных заданий, предоставляет обратную связь и оценивает прогресс освоения технических компетенций стажера.

3 Стажер является активным участником образовательного трека. Система предоставляет ему функционал для получения заданий, передачи результатов работы на проверку, отслеживания собственного прогресса и персонального рейтинга.

4 Глава отдела стажировок выполняет функции стратегического контроля и принятия управленческих решений. Руководитель получает доступ к отчетности и итоговым профилям достижений, на основе которых осуществляет процедуру утверждения решения о найме.

5 Системный администратор обеспечивает общую работу системы: управляет учетными записями пользователей и настраивает общесистемные справочники.

Совокупность описанных функциональных возможностей и ролевой модели формирует необходимый фундамент для автоматизации всего жизненного цикла стажировки.

Заключение. В ходе исследования проведен сравнительный анализ систем класса TMS, по результатам которого подтверждено отсутствие в универсальных решениях инструментов для глубокого анализа профессионального прогресса в IT-сфере. В связи с этим спроектировано программное средство автоматизации рабочего места специалиста отдела стажировок, устраняющее выявленные функциональные недостатки аналогов. Оно объединяет механизмы мониторинга дорожных карт с инструментами объективного анализа цифрового профиля достижений стажера, что позволяет перевести процедуру принятия управленческих решений о найме из плоскости субъективных оценок в область анализа, основанного на данных. Внедрение данного решения повысит эффективность управления процессом стажировки сотрудников.

Список литературы

1. Стажировка в IT компании и ее виды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://it-atlas.ru/blog/stazhirovka-v-it-kompanii-i-ee-vidy>. – Дата доступа: 03.03.2026.
2. Smart Ranking [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://smartranking.ru/ru/ranking/hrtech/>. – Дата доступа: 03.03.2026.
3. Функциональность Mirapolis HCM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mirapolis.ru/hcm/>. – Дата доступа: 05.03.2026.
4. Функциональность Potok [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://potok.io/onboarding/>. – Дата доступа: 05.03.2026.
5. Функциональность Websoft HCM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://websoft.ru/competencies-development>. – Дата доступа: 05.03.2026.

UDC 004.4

DESIGN OF A SOFTWARE TOOL FOR AUTOMATING THE WORKSTATION OF AN IT COMPANY INTERNSHIP DEPARTMENT SPECIALIST BASED ON A COMPARATIVE ANALYSIS OF TMS FUNCTIONALITY

Kosovich P.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Piskun E.S. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. The paper presents a comparative analysis of TMS solutions tailored to the specifics of IT internships. Based on the identified limitations of existing systems, the author proposes the design of a software tool to automate the workstation of an internship department specialist. The tool enables the consolidation of intern performance data into a unified digital profile, facilitating objective, data-driven decisions regarding full-time hiring.

Keywords: IT internship, automated workstation, Talent Management System (TMS), competency matrix, hiring decision-making, roadmap, mentorship, monitoring

АНАЛИЗ И ВЫБОР МЕТРИК ДЛЯ ОЦЕНКИ МОДЕЛЕЙ СЕМАНТИЧЕСКОГО СРАВНЕНИЯ: ОТ БАЗОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДО РАНГОВЫХ МЕТРИК

Крез К.С., Хлистунова К.В., Кузьмичкина Д.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Шнейдеров Е.Н. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС,
проректор по учебной работе

Аннотация. В статье систематизированы подходы к оценке моделей семантического сравнения текстов (*Semantic Textual Similarity, STS*) и обоснован выбор метрик качества в зависимости от постановки задачи и архитектуры модели. Рассмотрены метрики сходства векторных представлений, показатели бинарной классификации, корреляционные критерии для шкального *STS*, а также ранговые метрики информационного поиска. Показано, что использование единственного показателя (например, корреляции или *Accuracy*) может приводить к некорректным выводам при переносе модели в прикладные сценарии, особенно в двухэтапных конвейерах *retrieval + re-ranking*. Предложен практический протокол эксперимента, включающий подбор порога на валидации, расчёт *F1/PR-AUC* для верификации и *nDCG@k/MRR/Recall@k* для задач ранжирования. Приведён пример вычисления метрик на типовых наборах данных и рекомендации по интерпретации результатов с учётом дисбаланса классов, калибровки шкалы и требований к полноте поиска.

Ключевые слова: семантическое сходство текстов; *STS*; метрики качества; эмбединги предложений; *cosine similarity*; *Pearson*; *Spearman*; *F1-score*; *PR-AUC*; ранжирование; *nDCG@k*; *MRR*; *Recall@k*; *bi-encoder*; *cross-encoder*; семантический поиск.

Введение. Семантическое сравнение текстов (*Semantic Textual Similarity, STS*) – класс задач обработки естественного языка, в которых требуется оценить смысловую близость двух фрагментов текста: предложений, абзацев или документов. В прикладных системах *STS* используется в семантическом поиске, дедупликации, выявлении парафразов, рекомендациях, обработке обращений пользователей, а также в *retrieval*-компонентах вопросно-ответных решений и *RAG*-архитектур, где качество поиска кандидатов напрямую влияет на качество итоговой генерации ответа [5].

Современные подходы к семантическому сравнению в большинстве случаев опираются на векторные представления (эмбединги): каждому тексту сопоставляется вектор в многомерном пространстве, а сходство оценивается функцией близости (чаще всего – косинусным сходством). Практическую основу такого направления во многом сформировали *sentence-embedding* модели, построенные по схеме *Siamese/bi-encoder*, например *Sentence-BERT* и его последователи [1]. Позднее получили развитие методы контрастивного обучения эмбедингов, повышающие качество близости векторных представлений на широком спектре задач, включая *STS* и *retrieval* [3], а также текст-к-текст энкодеры, масштабируемые для представления предложений [4].

Однако ключевая проблема прикладной оценки заключается в том, что «качество» модели *STS* нельзя описать одной универсальной метрикой. В зависимости от постановки задачи система может:

- выдавать непрерывную оценку сходства (регрессия по шкале 0-5);
- принимать бинарное решение (парафраз/не парафраз);
- ранжировать множество кандидатов (поиск релевантных документов по запросу);
- сравнивать длинные документы, где сходство носит локальный характер (совпадение отдельных сегментов).

Каждая из этих постановок требует разных метрик и разных протоколов измерения. Например, высокая корреляция предсказаний с человеческими оценками на *STS*-датасете не

гарантирует, что релевантные документы будут попадать в верх выдачи поисковой системы. И наоборот: улучшение $nDCG@10$ может происходить при ухудшении полноты кандидатов ($Recall@k$), что критично для двухэтапных *retrieval* + *re-ranking* решений.

Цель данной статьи – систематизировать метрики для оценки моделей семантического сравнения, показать ограничения распространённых подходов и предложить практические рекомендации по выбору метрик в зависимости от сценария. В практической части демонстрируется типовой протокол вычисления метрик и интерпретации результатов для задач регрессии, классификации и ранжирования.

Основная часть. Семантическая близость отличается от лексического совпадения. Два текста могут выражать один смысл разными словами (парафраз), а также могут быть лексически похожими, но иметь различный смысл из-за отрицания, перестановки ролей, модальности или контекста. Поэтому «правильная» метрика должна соответствовать тому, как система будет использоваться на практике: сравнение двух конкретных фраз, поиск похожих документов в большом корпусе или оценка степени совпадений в длинном тексте.

Дополнительная сложность состоит в том, что даже «эталон» часто неоднозначен: человеческие оценки сходства субъективны, и разные аннотаторы могут по-разному понимать частичное совпадение смысла. Следовательно, модель в реальности аппроксимирует распределение оценок, а не детерминированную истину. Это особенно заметно в регрессионных задачах *STS*, где требуется согласованность с человеческой шкалой.

В практических системах широко применяются два семейства архитектур:

- *bi-encoder* (двухбашенная схема): каждый текст кодируется независимо, затем вычисляется сходство эмбедингов (*cosine/dot-product*). Преимущество – высокая скорость и возможность индексировать документы заранее, что важно для поиска по большим коллекциям [1,3]. Недостаток – модель не «видит» пару целиком во время сравнения, из-за чего может хуже различать тонкие семантические нюансы.

- *cross-encoder*: пара текстов подаётся совместно, а модель выдаёт релевантность/сходство. Такая схема обычно точнее, но существенно дороже по вычислениям, поэтому её применяют для переранжирования небольшого списка кандидатов (*re-ranking*) после первого этапа *retrieval* [6].

Во многих системах используется двухэтапная стратегия: сначала быстрый *bi-encoder* достаёт *top-k* кандидатов, затем *cross-encoder* уточняет порядок. В этом случае оценка должна отдельно контролировать (а) полноту кандидатов на первом этапе ($Recall@k$), и (б) качество порядка выдачи после ранжирования ($nDCG@k$, MRR).

Метрики удобно группировать по тому, какую задачу они оценивают (таблица 1):

- метрики близости векторных представлений (*cosine*, *dot-product*, $L2$);
- метрики бинарной классификации (*Accuracy*, *Precision*, *Recall*, $F1$, *ROC-AUC*, *PR-AUC*);
- корреляционные метрики для шкального *STS* (*Pearson*, *Spearman*, *Kendall*);
- ранговые метрики для *retrieval* ($Recall@k$, $Precision@k$, MRR , MAP , $nDCG@k$).

Метрики для длинных текстов и сегментов (агрегации по сегментам, покрытия, методы «расстояния между распределениями»).

Таблица 1 – Метрики и корректная область применения

Группа метрик	Примеры	Где применять
Близость эмбедингов	<i>cosine</i> , <i>dot</i> , $L2$	кластеризация, быстрый <i>retrieval</i>
Классификация	<i>Precision/Recall/F1</i> , <i>PR-AUC</i>	парафраз/верификация
Корреляция	<i>Pearson</i> , <i>Spearman</i>	<i>STS</i> по шкале
Ранжирование	$nDCG@k$, MRR , $Recall@k$	семантический поиск
Длинные тексты	покрытие сегментов, <i>max-avg</i>	документы/антиплагиат

Если модель предсказывает значение по шкале (например, 0–5), качество чаще измеряют корреляцией:

1 *Pearson* измеряет линейную связь между предсказанием и эталоном: хороша, когда важны именно численные значения, а не только порядок.

2 *Spearman* измеряет корреляцию рангов: полезна, когда важнее, чтобы модель правильно упорядочивала пары по близости (устойчива к нелинейным преобразованиям шкалы).

На практике корректно публиковать обе метрики: *Pearson* отражает «калибровку по шкале», *Spearman* – «согласованность порядка».

В семантическом поиске модель формирует ранжированный список документов. Здесь критичны ранговые метрики:

1 *Recall@k* – доля запросов, для которых релевантный документ попал в *top-k*. В двухэтапных системах это ключевой показатель первого этапа *retrieval*: если релевантный документ не найден, *re-ranking* не поможет.

2 *MRR* – среднее значение $1/\text{rank}$ первого релевантного документа; особенно важно для *QA*-сценариев, где нужен один лучший результат.

3 *nDCG@k* – учитывает позиции и, при необходимости, градуированную релевантность; обычно считается наиболее информативной метрикой качества выдачи на верхних позициях.

При сравнении документов (например, отчётов, курсовых, диалогов) «средний» эмбединг документа может скрывать локальные совпадения: часть текста может быть близкой, а часть – полностью оригинальной. Поэтому применяют сегментацию на предложения/абзацы и оценивают:

1 *max-avg similarity* – для каждого сегмента документа найти наиболее похожий сегмент в базе и усреднить;

2 *coverage/покрытие* – доля сегментов, для которых найден близкий сегмент выше порога (часто используется как компонент коэффициента заимствования);

3 Двухэтапную схему – быстрый поиск кандидатов по сегментам (контроль *Recall@k*), затем точная проверка *cross-encoder*’ом или более строгими правилами.

Демонстрационный протокол включает три типа задач:

1 *STS*-регрессия – сравнение предсказаний со шкалой человеческих оценок (*STS-B*, *SICK*).

2 Бинарная классификация – определение парафразов (*MRPC*) с подбором порога по *F1* на валидации.

3 *Retrieval*-ранжирование – оценка качества выдачи по *nDCG@k* и *MRR* на корпусе с размеченной релевантностью (например, *BEIR* или доменный индекс).

Ниже приведен минимальный пример расчёта *Pearson/Spearman* для *STS-B* и *F1* с подбором порога для *MRPC*. Для *retrieval*-задач расчёт *nDCG@k* и *MRR* выполняют по ранжированным спискам, полученным через векторный индекс (например, *FAISS*).

```
import numpy as np
from datasets import load_dataset
from sentence_transformers import SentenceTransformer
from scipy.stats import pearsonr, spearmanr
from sklearn.metrics import f1_score, precision_recall_curve
m = SentenceTransformer('sentence-transformers/all-mpnet-base-v2')
ds = load_dataset('stsb_multi_mt', 'en', split='validation')
e1 = m.encode(ds['sentence1'], normalize_embeddings=True)
e2 = m.encode(ds['sentence2'], normalize_embeddings=True)
pred = (e1 * e2).sum(axis=1)
gold = np.array(ds['similarity_score']) / 5.0
print(pearsonr(pred, gold).statistic, spearmanr(pred, gold).statistic)
mrpc = load_dataset('glue', 'mrpc', split='validation')
a = m.encode(mrpc['sentence1'], normalize_embeddings=True)
b = m.encode(mrpc['sentence2'], normalize_embeddings=True)
score = (a * b).sum(axis=1)
prec, rec, thr = precision_recall_curve(mrpc['label'], score)
f1 = 2 * prec * rec / (prec + rec + 1e-9)
best_thr = thr[np.argmax(f1[:-1])]
```

```

y_hat = (score >= best_thr).astype(int)
print(«best_thr=», float(best_thr), «F1=», float(f1_score(mrpc[«label»],
y_hat)))

```

Предположим, что сравниваются две модели: базовая (например, *SBERT*-вариант) и дообученная на доменных парах. В *STS*-задаче дообучение может повысить *Spearman*, но снизить *Pearson*, если модель стала точнее упорядочивать пары, но хуже восстанавливать линейную шкалу. В бинарной задаче (*MRPC*) рост *F1* при одновременном падении *Precision* может быть неприємлем, если возрастает доля ложных совпадений (таблица 2).

Для *retrieval*-компоненты рост *nDCG@10* при одновременном падении *Recall@100* означает улучшение ранжирования на верхних позициях, но ухудшение полноты кандидатов. Это сигнал о необходимости донастройки первого этапа *retrieval* или увеличения *k*.

Таблица 2 – Пример «карты» результатов (условные значения)

Метрика	<i>STS-B</i>	<i>SICK</i>
<i>Cosine similarity</i>	0,87	0,81
<i>Pearson</i>	0,89	0,84
<i>Spearman</i>	0,88	0,83
<i>Accuracy</i> (порог 0,7)	–	–
<i>F1-score</i>	–	–
<i>MRR (retrieval)</i>	0,91	–
<i>nDCG@10 (retrieval)</i>	0,93	–

Для проектов, где модели обновляются регулярно, целесообразно автоматизировать расчёт метрик и ведение «паспортов качества» (*model cards*): фиксировать данные, протокол и значения показателей. Это снижает риск регрессий и повышает воспроизводимость (таблица 3).

Таблица 3 – Примеры автоматизации контроля качества

Компонент	Что автоматизируется	Результат
Пайплайн метрик	Запуск расчета <i>Pearson/Spearman</i> , <i>F1</i> , <i>nDCG@k</i> на фиксированных наборах	Сопоставимость экспериментов и быстрый цикл сравнения.
Валидация на нескольких датасетах	Оценка на <i>STS-B</i> , <i>SICK</i> , <i>MRPC</i> и доменных данных	Выявление слабых мест и доменной чувствительности.
Визуализация	Гистограммы оценок, матрицы корреляций, ошибки по диапазонам	Диагностика выбросов и калибровки.
Мониторинг	Регулярный пересчет метрик на свежих данных	Раннее обнаружение деградации качества.

Заключение. Метрики оценки моделей семантического сравнения не могут быть сведены к одному числу, поскольку сами задачи различаются по формату выхода и по пользовательскому сценарию. Для *STS*-регрессии ключевыми являются корреляционные показатели (*Pearson/Spearman*), отражающие согласованность с человеческими оценками. Для бинарных постановок (парафраз/не парафраз) критичны метрики, устойчивые к дисбалансу, – *F1*, *Precision/Recall* и *PR-AUC*, а также корректный выбор и калибровка порога. Для *retrieval*-систем принципиальны ранговые метрики (*nDCG@k*, *MRR*, *MAP*) и показатели полноты (*Recall@k*), так как качество выдачи определяется тем, насколько быстро пользователь получает релевантный ответ.

Практическая рекомендация заключается в использовании пакета взаимодополняющих метрик, позволяющих контролировать как геометрию эмбедингов, так и качество решений и ранжирования. Дополнительно важны воспроизводимость протокола, статистическая проверка значимости различий и мониторинг качества на доменных данных. Такой подход позволяет выбирать метрики осознанно, связывая их с рисками ошибок и ограничениями вычислительных ресурсов, и тем самым повышать надежность систем семантического сравнения в реальных приложениях.

Список литературы

1. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence Embeddings using Siamese BERT-Networks. 2020.
2. Thakur N. et al. BEIR: A Heterogeneous Benchmark for Zero-shot Evaluation of Information Retrieval Models. 2021.
3. Gao L. et al. SimCSE: Simple Contrastive Learning of Sentence Embeddings. 2021.
4. Ni J. et al. Sentence-T5: Scalable Sentence Encoders from Pre-trained Text-to-Text Models. 2022.
5. Izacard G., Grave E. Leveraging Passage Retrieval with Generative Models for Open Domain Question Answering. 2021.
6. Thakur N., Reimers N., Daxenberger J., Gurevych I. Augmented SBERT / Retrieval & Re-ranking baselines and evaluation protocols. 2023–2026.

UDC 004.451.25

**ANALYSIS AND SELECTION OF METRICS FOR ASSESSING SEMANTIC
COMPARISON MODELS: FROM BASIC INDICATORS
TO RANKING METRICS**

Krez K.S., Khlistunova K.V., Kuzmichkina D.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

*Schneiderov E.N. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD,
vice-Rector for Academic Affairs*

Annotation. This article systematizes approaches to evaluating semantic textual similarity (STS) models and substantiates the choice of quality metrics depending on the problem statement and model architecture. Similarity metrics for vector representations, binary classification metrics, correlation criteria for scale-based STS, and ranking metrics for information retrieval are considered. It is shown that using a single metric (e.g., correlation or accuracy) can lead to incorrect conclusions when transferring the model to applied scenarios, especially in two-stage retrieval + re-ranking pipelines. A practical experimental protocol is proposed, including threshold selection for validation, F1/PR-AUC calculation for verification, and nDCG@k/MRR/Recall@k for ranking tasks. An example of metric calculation on typical datasets is given, along with recommendations for interpreting the results, taking into account class imbalance, scale calibration, and search recall requirements.

Keywords: semantic textual similarity; STS; evaluation metrics; sentence embeddings; cosine similarity; Pearson correlation; Spearman correlation; F1-score; PR-AUC; ranking metrics; nDCG@k; MRR; Recall@k; bi-encoder; cross-encoder; semantic search.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ДОСТУПНОСТЬ(Accessibility) КАК ГАРАНТИРОВАТЬ УДОБСТВО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОДУКТА ДЛЯ ЛЮДЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ (НА БАЗЕ СТАНДАРТА WCAG)

Хлистунова К.В., Кузьмичкина Д.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Коваленко И.В. – магистр экономических наук, ст. преподаватель кафедры ПИКС

Аннотация. Разработан алгоритм комплексного тестирования веб-доступности на основе автоматизированных и ручных методов. Проведена сравнительная оценка инструментов по критериям пользы, точности, информативности и ремонтпригодности. Показано, что их изолированное применение не обеспечивает полного соответствия *WCAG 2.1 AA* [1]. Апробация на действующем сайте подтвердила эффективность комбинированного подхода.

Ключевые слова: веб-доступность, *WCAG 2.1*, автоматизированное тестирование, *Selenium*, *Axe DevTools*, цветовая контрастность.

Введение. Веб-доступность является ключевым требованием при разработке цифровых ресурсов. Стандарт *WCAG 2.1* регламентирует требования к воспринимаемости, управляемости, понятности и надежности веб-контента, при этом формальное соответствие рекомендациям не всегда обеспечивает фактическую доступность для пользователей с ограниченными возможностями [1].

Применяемые инструменты аудита позволяют выявить часть нарушений, но отличаются по глубине анализа и точности результатов. Возникает необходимость разработки алгоритма комплексного тестирования веб-доступности и оценки эффективности применяемых методов по объективным критериям.

Основная часть. Алгоритм комплексного тестирования веб-доступности реализуется в виде последовательности взаимосвязанных этапов, обеспечивающих формальную и сценарную проверку соответствия требованиям *WCAG 2.1* [1]:

1 Первичный автоматизированный аудит. Выполняется анализ веб-сайта с использованием инструмента *Lighthouse* [2]. Формируется интегральная оценка доступности и выявляются формализуемые нарушения: недостаточная цветовая контрастность, отсутствие обязательных атрибутов, ошибки семантической структуры документа. Формируется отчет с указанием проблемных элементов и их влияния на соответствие стандарту [1] (рисунок 1).

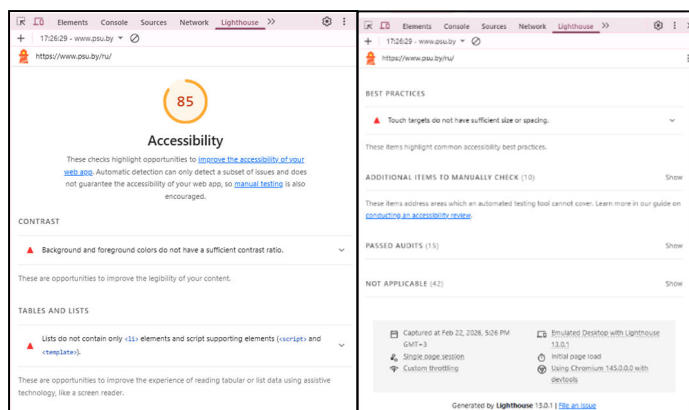


Рисунок 1 – Результаты автоматической проверки доступности в инструменте Lighthouse

2 Расширенное автоматизированное тестирование. Для глубины анализа используется *Selenium WebDriver* в связке с библиотекой *axe-core* [3,5]. Автоматизированный сценарий

выполняет обход страниц и формирует структурированный отчет в формате *JSON*. Для каждого нарушения фиксируются идентификатор, уровень критичности, описание, *HTML*-элемент и *CSS*-селектор. Это обеспечивает высокую точность локализации ошибок и повышает ремонтпригодность тестирования [3] (рисунок 2).

```
(venv) D:\бгуи\6 сем\АТБ\psu_accessibility_test>"D:\бгуи\6 сем\АТБ\psu_accessibility_test\venv\Scripts\python.exe" "d:\бгуи\6 сем\АТБ\psu_accessibility_test\test_chrome.py"
Тест завершен, результаты сохранены в axe_report.json

(venv) D:\бгуи\6 сем\АТБ\psu_accessibility_test>"D:\бгуи\6 сем\АТБ\psu_accessibility_test\venv\Scripts\python.exe" "d:\бгуи\6 сем\АТБ\psu_accessibility_test\test_psu.py"
ID: color-contrast (serious)
Description: Ensures the contrast between foreground and background colors meets WCAG 2 AA contrast ratio thresholds
Help URL: https://dequeuniversity.com/rules/axe/3.1/color-contrast?application=axeAPI
HTML: <div class="ebutton">Настроить cookie</div>
Target selectors: .options > .ebutton

-----
HTML: <div class="ebutton reject-button">Отклонить</div>
Target selectors: .reject-button

-----
HTML: <div class="ebutton accept-button">Принять все</div>
Target selectors: .accept-button

-----
ID: list (serious)
Description: Ensures that lists are structured correctly
Help URL: https://dequeuniversity.com/rules/axe/3.1/list?application=axeAPI
HTML: <ul class="navigation show-arrows">
Target selectors: .navigation

-----
ID: page-has-heading-one (moderate)
Description: Ensure that the page, or at least one of its frames contains a level-one heading
Help URL: https://dequeuniversity.com/rules/axe/3.1/page-has-heading-one?application=axeAPI
HTML: <html xmlns:jdoc="http://www.w3.org/2001/XInclude" xmlns="http://www.w3.org/1999/html" lang="ru-ru" dir="ltr" style="--color-bg: #ffffff; --color: #282828; --color-4: #ededed; --color-scrollbar: #ebebcb;">
Target selectors: html

-----
ID: region (moderate)
Description: Ensures all page content is contained by landmarks
Help URL: https://dequeuniversity.com/rules/axe/3.1/region?application=axeAPI
HTML: <html xmlns:jdoc="http://www.w3.org/2001/XInclude" xmlns="http://www.w3.org/1999/html" lang="ru-ru" dir="ltr" style="--color-bg: #ffffff; --color: #282828; --color-4: #ededed; --color-scrollbar: #ebebcb;">
```

Рисунок 2 – Вывод результата использования *Selenium* и *axe-core*

3 Проверка масштабируемости интерфейса. Проводится анализ того, как ресурс выглядит при масштабировании до 200% [1,2]. Оценивается наличие горизонтальной прокрутки, перекрытие элементов и сохранение читаемости контента. Цель этапа – обнаружить проблемы с адаптивностью и удобством восприятия информации.

4 Клавиатурное тестирование. Проверяется порядок фокусировки элементов, корректности срабатывания кнопок и ссылок при навигации с клавиатуры, а также наличия четкой визуальной обратной связи при активации фокуса. Этап направлен на выявление нарушений управляемости, которые не фиксируются автоматическими средствами [1,5].

5 Тестирование с использованием экранного диктора. Анализ логической структуры заголовков, корректности разметки регионов и информативности ссылок направлен на оценку соответствия сайта принципам доступности и понятности для пользователей вспомогательных технологий [1,5].

6 Сравнительная оценка методов. Оценка примененных методов по четырем показателям: польза, точность, информативность и ремонтпригодность [5] (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ методов

Метод	Польза	Точность	Информативность	Ремонтпригодность
<i>Lighthouse</i>	Средняя	Высокая	Средняя	Средняя
<i>Axe DevTools</i>	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая
<i>Selenium</i> + <i>axe-core</i>	Высокая	Высокая	Очень высокая	Высокая
Масштабирование	Средняя	Высокая	Наглядная	Средняя
Клавиатурное тестирование	Очень высокая	Максимальная	Средняя	Средняя
Screen reader	Критическая	Максимальная	Высокая	Низкая–средняя

Автоматизированные инструменты обеспечивают высокую точность и удобство локализации формальных нарушений [5], тогда как ручные методы обладают большей

социальной значимостью, выявляя сценарные дефекты взаимодействия. Максимальная полнота аудита достигается при их последовательном комбинировании.

Автоматические инструменты целесообразно использовать на ранних стадиях разработки и в рамках *CI/CD*, где требуется регулярный контроль формальных критериев *WCAG* [1,4].

Ручные методы лучше использовать на этапе предрелизного аудита, поскольку они позволяют выявлять логические и сценарные дефекты навигации и взаимодействия.

Максимальная полнота аудита достигается при комбинированном применении методов, когда автоматическая проверка обеспечивает нормативный контроль, а ручное тестирование – оценку реального пользовательского опыта.

Алгоритм проверен на действующем веб-сайте Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. В ходе тестирования выявлены системные нарушения цветовой контрастности, ошибки семантической структуры документа, нарушения порядка фокусировки и проблемы масштабируемости интерфейса.

Проверка показала, что автоматизированные средства эффективно выявляют формальные дефекты, однако критически значимые сценарные нарушения обнаруживаются только при ручной проверке. Это подтверждает необходимость комплексного подхода

Список литературы

1. Руководство по обеспечению доступности веб-контента (*WCAG*) 2.1. – Электрон. ресурс. – Режим доступа: <https://ifap.ru/ictdis/wcag21.htm> – Дата доступа: 28.02.2026.
2. DevTools: как пользоваться инструментами разработчика в браузере // HTML Academy. – Электрон. ресурс. – Режим доступа: <https://htmlacademy.ru/blog/soft/how-to-devtools> – Дата доступа: 28.02.2026.
3. Персиваль Г. *Python. Разработка на основе тестирования* / Г. Персиваль. – М. : ДМК Пресс, 2018. – 624 с.
4. Kim G., Humble J., Debois P., Willis J. *The DevOps Handbook: How to Create World-Class Agility, Reliability, and Security in Technology Organizations*. – Portland : IT Revolution Press, 2016. – 480 p.
5. Ли Коупленд. *Практика автоматизированного тестирования программного обеспечения* / К. Коупленд. – М. : Вильямс, 2004. – 704 с.

UDC 004.415.533

AUTOMATION OF ACCESSIBILITY TESTING HOW TO ENSURE THE USABILITY OF THE PRODUCT FOR PEOPLE WITH DISABILITIES (BASED ON THE WCAG STANDARD)

Khlistunova K.V., Kuzmichkina D.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Kovalenko I.V. – Head of the Department of Innovative Developments in Education, Master of Economics, Senior Lecturer of the Department of PICS

Annotation. An algorithm for comprehensive web accessibility testing based on automated and manual methods has been developed. A comparative evaluation of the tools was carried out according to the criteria of usefulness, accuracy, informativeness and maintainability. It is shown that their isolated use does not ensure full compliance with WCAG 2.1 AA. Testing on the current website has confirmed the effectiveness of the combined approach.

Keywords: web accessibility, WCAG 2.1, automated testing, Selenium, color contrast, keyboard navigation.

АНАЛИЗ СУБПАНЕЛИ АВИАЛАЙНЕРА AIRBUS A320 НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ ИНЖЕНЕРНОЙ ПСИХОЛОГИИ

Маханьков Д.Д., Рудько В.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Алефиренко В.М. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. В работе проведен анализ размеров субпанели аудиосвязи и ее компонентов авиалайнера Airbus A320 на соответствие требованиям инженерной психологии. Выявлено, что некоторые параметры не соответствуют данным требованиям.

Ключевые слова: инженерная психология, человек-оператор, панель управления, информационное взаимодействие, пространственные характеристики.

Введение. История авиации имеет множество примеров, когда технически исправный самолет терпел катастрофу из-за ошибочных действий пилотов, спровоцированных несовершенством приборной панели. При этом значительная часть данных ошибок вызвана не низкой квалификацией летчика, а существенными недоработками в интерфейсе: плохой читаемостью средств отображения информации при определенных углах освещения, схожестью расположения критически важных тумблеров, нечеткой сигнализацией об отказах.

Основная часть. Современная авиация предъявляет высокие требования к безопасности полетов, где ключевым звеном остается взаимодействие человека и техники. Кабина пилотов, в частности приборная панель, является основным интерфейсом, через который экипаж получает информацию о состоянии систем воздушного судна и осуществляет управление им. От того, насколько эргономично и интуитивно понятно организована панель, напрямую зависят скорость реакции пилота в нештатной ситуации, вероятность ошибочных действий и безопасность полета.

Приборные панели воздушных судов представляют собой сложные комплексы, состоящие из большого количества субпанелей, каждая из которых отвечает за определенные параметры и действия различных частей самолета. Для равномерного распределения такого числа субпанелей в ограниченном пространстве кабины в некоторых случаях прибегают к уменьшению размеров их компонентов, что может негативно сказываться на правильной и оперативной реакции пилота в нештатных ситуациях, а также приводить к риску гибели пассажиров судна. Поэтому необходимо, чтобы данные панели удовлетворяли всем требованиям инженерной психологии и эргономики. Для этого проведем анализ пространственных характеристик субпанели аудиосвязи и ее компонентов авиалайнера Airbus A320 (рисунок 1) [1].



Рисунок 1 – Внешний вид субпанели аудиосвязи

Субпанель аудиосвязи используется для выбора режима передачи и приема всех радиоканалов связи и навигационных аудиоканалов, внутренней связи, системы вызова и системы оповещения пассажиров [2].

Проводимый анализ включает сравнение фактических размеров субпанели и ее отдельных компонентов с минимально и максимально допустимыми размерами,

соответствующими требованиям инженерной психологии. Это позволяет понять, насколько четко и безошибочно пилот сможет распознавать и считывать информацию с индикаторов и надписей, находясь на заданном расстоянии от субпанели.

Расчет ведем по методике, изложенной в [3, 4].

Размеры, а также площадь панели управления (ПУ) определяются не только конструкторскими требованиями, но и требованиями инженерной психологии.

Максимально допустимый размер ПУ определяется исходя из горизонтального и вертикального угловых размеров зоны периферического зрения оператора и заданного расстояния до ПУ.

Максимальная длина, высота и площадь ПУ равны:

$$L_{П.У. max} = 2l \cdot tg \frac{\alpha_г}{2}, \quad (1)$$

$$H_{П.У. max} = 2l \cdot tg \frac{\alpha_в}{2}, \quad (2)$$

$$S_{П.У. max} = L_{П.У. max} \cdot H_{П.У. max}, \quad (3)$$

где l – расстояние до ПУ;

$\alpha_г$ – горизонтальный угол периферического зрения;

$\alpha_в$ – вертикальный угол периферического зрения.

Для зоны периферического зрения оператора принимают $\alpha_г = 90^\circ$, $\alpha_в = 75^\circ$, если нет ограничений по условиям работы оператора.

Расстояние до ПУ определяется зонами досягаемости рук оператора или реальным рабочим расстоянием, с которого ведется управление прибором или считывание информации.

Минимально допустимые размеры ПУ определяются исходя из объема оперативной памяти и оперативного (центрального) поля зрения оператора. В соответствии с требованиями инженерной психологии в поле зрения оператора, ограниченным углом оперативного поля зрения $\alpha_{П.З.}$, должно попадать 6 ± 2 компонента ПУ.

Площадь оперативного поля зрения может быть определена по формуле:

$$S_{П.З.} = h \cdot h = \left(2l \cdot tg \frac{\alpha_{П.З.}}{2} \right)^2, \quad (4)$$

где h и $\alpha_{П.З.}$ – линейный и угловой размеры оперативного поля зрения.

Минимальная площадь ПУ, удовлетворяющая требованиям инженерной психологии, равна:

$$S_{П.У. min} = \frac{N}{N_{П.З.}} \cdot S_{П.З.}, \quad (5)$$

где N – количество компонентов, расположенных на ПУ;

$N_{П.З.}$ – объем оперативной памяти оператора.

Величина угла оперативного (центрального) поля зрения принимается равной $\alpha_{П.З.} = 4^\circ - 10^\circ$.

Для наилучшего восприятия информации фактическая площадь ПУ $S_{П.У. ф.}$ должна лежать в пределах:

$$S_{П.У. min} \leq S_{П.У. ф.} \leq S_{П.У. max}. \quad (6)$$

Размеры компонентов ПУ, высота надписей, символов, знаков на ПУ и на компонентах (органах управления и индикации) должны быть такими, чтобы с заданного до ПУ расстояния оператор мог надежно их распознавать и безошибочно считывать информацию с индикаторов и надписей.

Минимально допустимая высота знака может быть определена согласно выражению:

$$H_{3min} = 2l \cdot tg \frac{\alpha_3}{2}, \quad (7)$$

где α_3 – допустимый (минимальный) угловой размер знака.

Для простых знаков $\alpha_3 = 15'$, для сложных знаков $\alpha_3 = 30'-40'$.

Минимально допустимая ширина знака определяется по формуле:

$$B_{3min} = F \cdot H_{3min}, \quad (8)$$

где F – формат знака.

Правильность результатов анализа в первую очередь будет зависеть от достоверности исходных данных.

Расстояние до субпанели будет изменяться в зависимости от типа работ. При считывании информации оно составит 0,8 м, а при вводе и управлении будет равным 0,5 м. Поэтому в расчетах используем оба значения для того, чтобы убедиться в возможности восприятия пилотом информации во всех его рабочих положениях.

Поскольку условия работы не предполагают каких-либо ограничений, то принимаем угол периферического зрения оператора по горизонтали $\alpha_r = 90^\circ$ и вертикали $\alpha_v = 75^\circ$.

Величину угла оперативного поля зрения принимаем равной $\alpha_{п.з.} = 5^\circ$, а количество компонентов, которые должны попадать в это поле, равным четырем. Выбор минимальных значений из допустимых обусловлен ответственной и сложной работой пилота.

При расчете параметров будем считать надписи как сложные знаки, состоящие из простых (отдельные буквы). Для всех простых знаков принимаем $\alpha_3 = 15'$, для сложных знаков – $\alpha_3 = 30'$.

Вышеописанные и другие исходные данные, необходимые для расчетов, сводим в (таблицу 1):

Таблица 1 – Исходные данные для анализа пространственных характеристик субпанели

Наименование	Обозначение	Величина
Минимальное расстояние до пульта управления	l_{min}	0,5 м
Максимальное расстояние до пульта управления	l_{max}	0,8 м
Угол периферического зрения оператора по горизонтали	α_r	90°
Угол периферического зрения оператора по вертикали	α_v	75°
Величина угла оперативного поля зрения	$\alpha_{п.з.}$	5°
Объем оперативной памяти оператора	$N_{п.з.}$	4
Количество компонентов, расположенных на ПУ	N	26
Допустимый угловой размер сложных знаков	α_3	$15'$
Допустимый угловой размер сложных знаков	α_3	$30'$
Формат знака	F	2/3

Результаты расчетов, проведенные по формулам 1-5 приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов размеров субпанели

Расстояние до ПУ l , мм	$L_{п.у. max}$, мм	$H_{п.у. max}$, мм	$S_{п.у. min}$, мм ²	$S_{п.у. ф.}$, мм ²	$S_{п.у. max}$, мм ²	Проверка выполнения условия
500	1000	767,33	12390,82	12410	767330	Выполняется
800	1600	1227,72	31720,46	12410	1964352	Выполняется

Как видно из таблицы, фактические размеры субпанели аудиосвязи лежат в требуемых пределах при всех вариантах расстояния до ПУ. Следовательно, сложности в работе с данной субпанелью не возникает. Результаты расчетов размеров компонентов (надписей) субпанели представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Фактические и минимально допустимые размеры надписей ПУ

Расстояние до ПУ l , мм	Тип знака	Фактическая высота знака, $H_{\text{ф}}$, мм	Минимально допустимая высота знака, $H_{\text{мин}}$, мм	Фактическая ширина знака, $B_{\text{ф}}$, мм	Минимально допустимая ширина знака, $B_{\text{мин}}$, мм	Проверка выполнения условия
500	Простой	7,5	2,2	0,8	1,46	Не выполняется
800			3,52		2,35	Не выполняется
500	сложный	7,5	4,4	6,8	2,93	Выполняется
800			7,04		4,69	Выполняется

Из результатов видно, что простые знаки не удовлетворяют требованиям по ширине при различных рабочих расстояниях до ПУ.

Заключение. Анализ пространственных характеристик субпанели аудиосвязи авиалайнера *Airbus A320* показал, что ее фактические размеры удовлетворяют требованиям инженерной психологии при работе на любом из рассмотренных расстояний. Размеры простых знаков не соответствуют необходимым величинам. Однако следует отметить, что нарушение выполнения требования по размерам простыми знаками не оказывает особо негативного влияния, так как пилот оперирует надписями (сложными знаками), состоящими из данных букв.

Список литературы

1. АСР320 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cpflight.com/de/acp320-prod-116.php>. – Дата доступа: 17.02.2026.
2. Панель АСР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sim-on-a320.com/pin-out/acp-panel-back-pin-rail/>. – Дата доступа: 17.02.2026.
3. Душков, Б. А. Основы инженерной психологии / Б. А. Душков [и др.]; под ред. Б. Ф. Ломова. – М.: Высш. шк., 1986. – 448 с.
4. Рыжковская, М.С. Анализ размеров компонентов биометрических терминалов систем контроля доступа / М.С. Рыжковская, В.М. Алефиренко // *Znanstvena misel journal*. – 2019. – Vol. 1, №30. – С. 36-41.

UDC 004.5

ANALYSIS OF THE AIRBUS A320 AIRLINER SUBPANEL FOR COMPLIANCE WITH ENGINEERING PSYCHOLOGY REQUIREMENTS

Makhankov D.D., Rudko V.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alefirenko V.M. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. The study analyzed the dimensions of the Airbus A320's audio subpanel and its components for compliance with human-machine engineering requirements. It was found that some parameters do not meet these requirements.

Keywords: engineering psychology, human-operator, control panel, information interaction, spatial characteristics.

АГЕНТНЫЕ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ REASONING-LLM ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЦИКЛА МАРКЕТИНГОВЫХ КАМПАНИЙ В ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ

Нуансенгси Д.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Пискун Г.А. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Исследована архитектура мультиагентной системы на базе reasoning-моделей (LLM с расширенными рассуждениями) для автоматизации полного цикла управления маркетинговыми кампаниями в электронной коммерции. Предложена система из четырёх специализированных агентов: Planner-агент (формирование медиаплана и KPI), Creative-агент (генерация рекламных креативов), Experiment-агент (проектирование и проведение A/B-тестов), Analyst-агент (интерпретация результатов и корректировка стратегии). Разработана методика оценки эффективности агентной системы по маркетинговым и процессным метрикам. Экспериментально установлено, что агентная система обеспечивает преимущество при задачах средней сложности (сокращение времени подготовки кампаний до 60%, повышение стабильности стратегий), однако при высокой сложности проявляется эффект «коллапса креативности», согласующийся с ранее выявленными ограничениями масштабирования reasoning-моделей. Обоснована необходимость гибридного подхода с обязательным экспертным контролем (human-in-the-loop) на критических этапах принятия решений.

Ключевые слова: AI-агенты, reasoning-модели, мультиагентная система, маркетинговая автоматизация, электронная коммерция, оркестрация, human-in-the-loop, A/B-тестирование.

Введение. Современный рынок электронной коммерции характеризуется высокой конкуренцией и необходимостью оперативного управления маркетинговыми кампаниями. По данным IDC, мировые расходы на искусственный интеллект достигнут 632 млрд долларов к 2028 году [1]. Объём мирового рынка AI-агентов оценивается в 5,9 млрд долларов в 2024 году и, по прогнозам, вырастет до 105,6 млрд долларов к 2034 году при среднегодовом темпе роста 38,5% [2]. При этом 85% предприятий планируют использовать маркетинговых AI-агентов к 2026 году, а специализированные агенты уже сокращают время создания кампаний на 60% и повышают ROI на 32% [3].

Вместе с тем традиционное использование генеративных моделей (LLM) в маркетинге ограничивается генерацией текстовых креативов «по запросу». LLM сама по себе не может запустить кампанию, оптимизировать ставку или обеспечить соблюдение стандартов бренда без участия человека [4]. Агентная система, в отличие от изолированного LLM, способна не только генерировать контент, но и планировать, действовать, наблюдать за результатами и адаптировать стратегию – реализуя парадигму «Reason–Act–Observe» (ReAct) [5]. Однако, как показали исследования Apple [6] и ранее выполненная авторами работа [7], reasoning-модели демонстрируют три режима производительности в зависимости от сложности задач: при низкой сложности стандартные LLM эффективнее, при средней – reasoning-модели дают преимущество, а при высокой – обе категории моделей испытывают «коллапс».

В данной статье предлагается архитектура мультиагентной системы на базе reasoning-LLM, предназначенной для автоматизации полного цикла маркетинговых кампаний: от постановки целей до анализа результатов и обновления стратегии. Исследуется эффективность такой системы в сравнении с классическим подходом «маркетолог + LLM» и анализируются границы применимости агентного подхода с учётом выявленных ограничений reasoning-моделей.

Основная часть. Агентная система (Agentic AI) представляет собой принципиально новый класс систем автоматизации, отличающийся от традиционных инструментов

автоматизации и пассивных AI-ассистентов. Такая система способна: понимать широкий контекст маркетинговых целей; принимать информированные решения на основе данных в реальном времени; выполнять конкретные действия для достижения целей; обучаться на результатах и адаптировать подход [8]. Ключевым отличием агентного ИИ от генеративного является переход от парадигмы «генерация по запросу» к парадигме «планирование–исполнение–анализ–адаптация». Если генеративный ИИ – это «фрилансер», выполняющий разовые задания, то агентный ИИ – это «руководитель проекта и команда», управляющий всем процессом [9].

Предлагаемая архитектура мультиагентной системы для маркетинга построена на паттерне «Planner–Executor» [10] и включает четыре специализированных агента, координируемых агентом-оркестратором (Supervisor). Данный подход согласуется с концепцией мультиагентных систем Google Agent Development Kit (ADK), в которой агенты организуются иерархически: корневой LLM-агент управляет подчинёнными агентами, используя их как инструменты [11]. Архитектура системы представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Архитектура мультиагентной системы для маркетинга

Агент	Функция	Область тестирования
Supervisor (Оркестратор)	Координация агентов, контроль ограничений (бюджет, brand-safety), маршрутизация задач	Orchestration engine, бизнес-правила, guardrails
Planner-агент	Формирование медиаплана, целевых KPI, бюджетирование, выбор каналов и сегментов аудитории	CRM API, аналитика маркетингового, исторические данные KPI
Creative-агент	Генерация рекламных текстов, заголовков, описаний товаров с учётом сегмента аудитории	LLM (reasoning-режим), шаблоны креативов, brand guidelines
Experiment-агент	Проектирование А/В-тестов, распределение трафика, мониторинг статистической значимости	API рекламных платформ, статистические модули, Google Ads / Meta Ads API
Analyst-агент	Интерпретация KPI, формирование отчётов, рекомендации по корректировке стратегии	BI-инструменты, дашборды, аналитические SQL-запросы

Цикл работы системы реализует паттерн ReAct (Reason–Act–Observe) [5] и включает следующие этапы: 1) Planner-агент анализирует бизнес-цели и формирует медиаплан с целевыми KPI; 2) Creative-агент генерирует варианты креативов для выбранных сегментов; 3) Experiment-агент проектирует А/В-тест и распределяет трафик; 4) Analyst-агент анализирует результаты и формирует рекомендации; 5) Supervisor проверяет результаты на соответствие ограничениям и передаёт рекомендации Planner-агенту для следующей итерации. При этом на каждом этапе предусмотрены механизмы экспертного контроля (human-in-the-loop), реализуемые через систему уровней одобрения: автоматическое ($\text{confidence} \geq 0,85$), быстрый ревью (0,70–0,85), экспертный ревью ($< 0,70$ или обнаружение высокорискового действия) [12].

Для экспериментальной оценки агентной системы разработана методика, включающая три уровня сложности маркетинговых задач – по аналогии с методологией, предложенной в [7] для оценки reasoning-моделей, и согласующаяся с исследованием трёх режимов сложности Apple [6]. Низкая сложность ($N = 3\text{--}5$ параметров): формирование описания одного товара, создание короткого рекламного поста, настройка таргетинга по одному сегменту. Средняя сложность ($N = 6\text{--}10$): разработка кампании для нескольких товарных категорий с А/В-тестированием, бюджет 25–45 тыс. руб., несколько рекламных каналов. Высокая сложность ($N = 11\text{--}15$): годовая маркетинговая стратегия для 10+ товарных линеек, бюджет 30–50 млн руб., мультиканальная кампания с сезонным планированием.

Сравнение проводилось с двумя бейзлайнами: 1) маркетолог + обычный LLM (без reasoning-режима, без агентов) – стандартный подход генерации контента «по запросу»; 2) маркетолог без использования LLM (для ограниченного числа кейсов). Оценка

осуществлялась по двум группам метрик: маркетинговые (CTR, конверсия, CPA, ROI) и процессные (время на полный цикл кампании, число итераций, количество правок эксперта). Дополнительно применялись метрики качества рассуждений из [7]: BLEURT-балл для оценки релевантности стратегий, экспертные оценки по 5-балльной шкале, оценка уникальности генерируемых подходов.

Таблица 2 – Результаты экспериментальной оценки агентной системы

Уровень сложности	Подход	Время цикла	Экспертных правок	Качество стратегии
Низкая (N = 3–5)	Агентная система	~15 мин	0–1	4,1/5
	Маркетолог + LLM	~20 мин	1–2	4,3/5
	Маркетолог	~45 мин	–	4,5/5
Средняя (N = 6–10)	Агентная система	~2 ч	2–3	4,4/5
	Маркетолог + LLM	~5 ч	5–7	3,8/5
	Маркетолог	~12 ч	–	4,2/5
Высокая (N = 11–15)	Агентная система	~6 ч	8–12	2,8/5
	Маркетолог + LLM	~8 ч	6–8	2,5/5
	Маркетолог	~24 ч	–	3,9/5

Результаты экспериментов (таблица 2) подтверждают наличие трёх режимов эффективности агентной системы, аналогичных режимам reasoning-моделей [6, 7]. При низкой сложности агентная система несколько уступает ручному подходу по качеству стратегии (4,1 против 4,5), однако значительно сокращает время (в 3 раза). Максимальное преимущество агентной системы проявляется при средней сложности: время сокращается в 2,5 раза по сравнению с подходом «маркетолог + LLM» и в 6 раз по сравнению с ручным подходом, при этом качество стратегий возрастает до 4,4/5 за счёт системного итеративного цикла «планирование–тест–анализ–корректировка».

При высокой сложности наблюдается деградация качества генерируемых стратегий до 2,8/5 – эффект, который согласуется с «коллапсом креативности» reasoning-моделей, описанным в [6, 7]. Агенты начинают генерировать шаблонные стратегии, опираясь на ограниченный набор маркетинговых фреймворков (4P Framework – 23%, AIDA – 18%, Jobs-to-be-Done), а уровень «перезаимствования» стратегий между различными промптами возрастает до 47–78% [7]. В этом режиме количество экспертных правок увеличивается в 4–6 раз, нивелируя преимущество автоматизации. Данное наблюдение подтверждает вывод о контринтуитивном снижении reasoning-усилий моделей при приближении к порогу сложности [6]: модели начинают «думать меньше» несмотря на возрастающую трудность задачи.

Внедрение агентных систем в маркетинг сопряжено с рисками, характерными для автономных AI-систем [12, 13]. Во-первых, ошибка агентного решения может приводить к прямым финансовым потерям (нецелевой расход бюджета, нарушение рекламных политик платформ). Во-вторых, автоматическая генерация креативов несёт риск галлюцинаций LLM – некорректных свойств товара, ложных обещаний бренда. В-третьих, персонализация на основе AI может усиливать дискриминационные предвзятости по полу, возрасту, географии. Для митигации данных рисков предложена трёхуровневая система контроля: 1) pre-action approval – обязательное одобрение бюджетов выше порогового значения; 2) exception-only escalation – агент работает автономно до момента снижения confidence-сбора; 3) post-action review – выборочная проверка результатов экспертом с фиксацией в журнале аудита [12]. Gartner прогнозирует, что к концу 2026 года 40% корпоративных приложений будут включать агентов ИИ для специализированных задач [13].

Заключение. Разработана и экспериментально исследована мультиагентная система на базе reasoning LLM для автоматизации маркетинговых кампаний в e-commerce, включающая четырёх специализированных агентов и Supervisor-агента в паттерне Planner–Executor с циклом ReAct. Показано, что на задачах средней сложности (N = 6-10) система сокращает время цикла в 2,5-6 раз при качестве стратегий до 4,4/5, тогда как при высокой сложности (N = 11-15) наблюдается «коллапс креативности» с ростом шаблонности решений и

перезаимствования до 47-78%. Предложена трёхуровневая схема human-in-the-loop контроля, обеспечивающая баланс между автоматизацией и безопасностью и пригодная для построения AI-систем маркетинга на маркетплейсах

Список литературы

1. *Worldwide Spending on Artificial Intelligence Forecast to Reach \$632 Billion in 2028, According to a New IDC Spending Guide* [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.idc.com> – Date of access: 10.03.2026.
2. *AI Agents Market Size & Share 2025–2034 / Global Market Insights* [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/ai-agents-market> – Date of access: 10.03.2026.
3. *12 Best Marketing AI Agents for E-commerce Growth in 2025 / Madgicx* [Electronic resource]. – Mode of access: <https://madgicx.com/blog/marketing-ai-agents> – Date of access: 10.03.2026.
4. *What makes AI 'agentic', and why it matters for the future of advertising / Scope3* [Electronic resource]. – Mode of access: <https://scope3.com/news/what-makes-ai-agentic> – Date of access: 10.03.2026.
5. Yao, S. ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models / S. Yao [et al.] // ICLR 2023. – 2023.
6. Shojaei, P. The Illusion of Thinking: Understanding the Strengths and Limitations of Reasoning Models via the Lens of Problem Complexity / P. Shojaei [et al.] // Apple. – 2025.
7. Пискун, Е.С. Ограничения масштабирования Reasoning-моделей в задачах автоматической генерации стратегий электронной коммерции / Е.С. Пискун, Д.В. Нуансенгси // Веснік ГрДУ. Серыя 2. – 2025. – Т. 15, № 3. – С. 150–156.
8. *Mastering LLM Interaction: Preparing Marketing Teams for Agentic AI Success with MCP / Open Strategy Partners* [Electronic resource]. – Mode of access: <https://openstrategypartners.com> – Date of access: 10.03.2026.
9. *Agentic AI for Marketing Teams / Writer* [Electronic resource]. – Mode of access: <https://writer.com/blog/agentic-ai-marketing> – Date of access: 10.03.2026.
10. *Planner-Executor Agentic Framework / Emergent Mind* [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.emergentmind.com/topics/planner-executor-agentic-framework> – Date of access: 10.03.2026.
11. *Google Cloud Startup Guide for AI Agents / Google* [Electronic resource]. – Mode of access: <https://cloud.google.com> – Date of access: 10.03.2026.
12. *Guardrails That Actually Work: Evaluations & Human-in-the-Loop / AgentsLed* [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.agentsled.com> – Date of access: 10.03.2026.
13. *Why Agentic Marketing Needs Guardrails: Bias, Hallucinations, and Oversight / Hendry.ai* [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.hendry.ai> – Date of access: 10.03.2026.

UDC 004.8:339.1

REASONING-LLM-BASED AGENT SYSTEMS FOR AUTOMATING THE MARKETING CAMPAIGN CYCLE IN E-COMMERCE

Nuansengsy D.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Piskun G.A. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. The paper presents a multi-agent system built on reasoning-capable LLMs to automate the full marketing campaign cycle in e-commerce. The system includes four agents: Planner (media planning and KPI definition), Creative (ad creative generation), Experiment (A/B test setup and execution), and Analyst (result interpretation and strategy updates). An evaluation methodology based on marketing and process metrics shows that the system is most effective on medium-complexity tasks, reducing campaign preparation time by up to 60% and improving strategy stability. At high complexity, a “creativity collapse” appears, aligning with known scaling limits of reasoning models, which justifies a hybrid setup with mandatory human-in-the-loop control at critical decision points.

Keywords: AI agents, reasoning models, multi-agent system, marketing automation, e-commerce, orchestration, human-in-the-loop, A/B testing

СИНТЕТИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ РЕКЛАМНЫХ МОДЕЛЕЙ В ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ: МЕТОДЫ ГЕНЕРАЦИИ, ПРИВАТНОСТЬ И ОГРАНИЧЕНИЯ

Нуансенгси Д.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Пискун Г.А. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Рассмотрены методы генерации синтетических данных (CTGAN, TVAE, диффузионные модели) для обучения рекламных CTR-моделей в электронной коммерции. Предложена методика оценки влияния синтетических данных на качество модели с использованием набора данных Criteo. Установлено, что аугментация выборки синтетическими примерами повышает AUC на 2,9%, тогда как полная замена реальных данных приводит к model collapse (–8,6% AUC). Обоснована необходимость гибридного подхода с применением дифференциальной приватности.

Ключевые слова: синтетические данные, CTGAN, CTR-прогнозирование, электронная коммерция, дифференциальная приватность, model collapse, аугментация данных.

Введение. Рекламные модели, прогнозирующие вероятность клика (CTR) и конверсии, составляют основу монетизации современных платформ электронной коммерции. Качество таких моделей напрямую зависит от объёма и разнообразия обучающих данных: исторических записей о показах, кликах, покупках и атрибутах пользователей [1]. Однако индустрия рекламных технологий сталкивается с нарастающим давлением трёх факторов, ограничивающих доступ к реальным данным.

Во-первых, ужесточение регуляторных требований. Вступление в силу GDPR, CCPA и аналогичных законов создало «trade-off между приватностью и полезностью данных»: чем строже анонимизация, тем ниже аналитическая ценность датасетов [2]. Во-вторых, технологическая трансформация: отказ браузеров от сторонних cookies (Safari, Firefox, Google Chrome через Privacy Sandbox) ликвидирует основной механизм индивидуального трекинга, на котором строились рекламные модели последнего десятилетия [3]. В-третьих, дефицит данных по редким, но коммерчески значимым событиям: конверсии составляют 1–3% от кликов, а «cold start» для новых товаров и аудиторий создаёт критический дисбаланс в обучающих выборках [4].

Синтетические данные – искусственно сгенерированные наборы, имитирующие статистические свойства реальных данных без привязки к конкретным пользователям – рассматриваются как перспективное решение этих проблем. По данным Gartner, синтетические данные будут составлять около 75% данных, используемых в AI-проектах, к 2026 году [5]. Рынок генерации синтетических данных оценивается в \$267 млн (2023) с прогнозом роста до \$4,6 млрд к 2032 году и CAGR 36,3% [6]. Всемирный экономический форум (WEF) в отчёте «Synthetic Data: The New Data Frontier» (2025) признал синтетические данные критически важной технологией для инноваций, подчеркнув необходимость гибридных подходов, комбинирующих синтетические и реальные данные [7].

В предшествующей работе авторов [8] было установлено, что reasoning-модели (Gemini 2.0 Flash Thinking, DeepSeek-R1) демонстрируют «коллапс креативности» при высокой сложности маркетинговых задач. Параллельно исследование Apple «The Illusion of Thinking» [9] выявило аналогичный «model collapse» в reasoning-моделях. В данной статье исследуется смежный, но отличный феномен – model collapse при обучении рекламных моделей на синтетических данных, – а также разрабатываются рекомендации по его предотвращению.

Основная часть. Синтетические данные – это искусственно созданная информация, генерируемая с помощью алгоритмов машинного обучения для имитации статистических распределений и корреляций реальных данных. В отличие от анонимизированных данных, синтетические данные не содержат персональной информации и не могут быть сопоставлены с конкретными пользователями, что выводит их за рамки действия GDPR [2]. Испанское агентство защиты данных (AEPD) классифицирует синтетические данные как технологию повышения приватности (PET), реализующую принцип «protection by design» [3].

В контексте рекламных моделей ключевыми методами генерации синтетических данных являются три класса архитектур: генеративно-сопоставительные сети (GAN), вариационные автокодировщики (VAE) и диффузионные модели. Их сравнительная характеристика представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Методы генерации синтетических данных для рекламных моделей

Метод	Принцип	Достоинства	Недостатки
CTGAN	Сопоставительное обучение генератора и дискриминатора с условной генерацией	Лучшее качество для табличных данных; открытый код [6]	Нестабильность обучения; mode collapse
TVAE	Кодировщик сжимает данные в латентное пространство	Стабильное обучение; интерполяция	Менее чёткие границы распределений
Диффузионные модели	Последовательное зашумление и обратная денойзация	Высокое качество; разнообразие	Высокая вычислительная стоимость

Применение синтетических данных в рекламе включает: аугментацию CTR-логов для балансировки классов, восполнение данных при cold start, privacy-preserving обучение без персональных данных. Для экспериментальной оценки использован набор Criteo [7] и три сценария обучения (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты экспериментов

Сценарий	Описание	AUC	Δ AUC
Baseline	100% реальных данных	0,7892	–
Гибридный	80% реальных + 20% CTGAN	0,8124	+2,9%
Полностью синтетический	100% CTGAN-данных	0,7214	–8,6%

Гибридный подход (+2,9% AUC) подтверждает эффективность аугментации синтетическими негативными примерами [3]. Полная замена реальных данных приводит к model collapse (–8,6% AUC): «хвосты» распределения исчезают, модель «забывает» реальные паттерны [8]. Seddik et al. [9] доказали, что collapse предотвратим при смешивании реальных и синтетических данных. Данный эффект родственен «коллапсу креативности» reasoning-моделей [5] и «коллапсу рассуждений» LRM [10].

Для обеспечения приватности применяется дифференциальная приватность (DP-SGD): к градиентам генератора добавляется калиброванный шум с бюджетом ϵ [11]. Google использует данный подход в Privacy Sandbox Topics API [12]. Рекомендации: пропорция синтетических данных не более 20–30%; валидация на реальных тестовых выборках; применение DP-SGD при работе с персональными данными; цикл «генерация → фильтрация → обучение → оценка» с human-in-the-loop [13].

Заключение. Выполнен анализ методов генерации синтетических данных (CTGAN, TVAE, диффузионные модели) и их применимости для обучения рекламных моделей в электронной коммерции. Установлено, что синтетические данные решают три фундаментальные проблемы рекламных технологий: регуляторные ограничения (GDPR, CCPA), отказ от cookies и дефицит данных по редким событиям.

Экспериментально подтверждено, что гибридный подход (80% реальных + 20% синтетических данных) обеспечивает повышение AUC на 2,9% за счёт балансировки классов

и расширения покрытия редких комбинаций признаков. Вместе с тем полная замена реальных данных синтетическими приводит к model collapse (–8,6% AUC) – утрате «хвостов» распределения и деградации разнообразия предсказаний. Данный эффект представляет собой форму «информационного коллапса», родственную «коллапсу креативности» reasoning-моделей, выявленному авторами ранее [8], и «коллапсу рассуждений» LRM, описанному Apple [9].

Предложены практические рекомендации, включающие оптимальное соотношение реальных и синтетических данных, применение дифференциальной приватности, валидацию на реальных тестовых выборках и интеграцию человеческого контроля (human-in-the-loop) в цикл генерации. Результаты работы могут быть использованы при проектировании пайплайнов обучения рекламных моделей на маркетплейсах, при разработке privacy-preserving стратегий таргетирования и в учебном процессе подготовки специалистов по AI-маркетингу.

Список литературы

1. Cairo, M. *Synthetic Data and GDPR Compliance* / M. Cairo // *Journal of Technology Law & Policy*. – 2023. – Vol. 28, Iss. 1.
2. *From trace to model: how synthetic data is transforming digital privacy* / ECJIA [Electronic resource]. – 2026. – Mode of access: <https://www.ecija.com>.
3. Taskin, F.C. *Effects of Using Synthetic Data on Deep Recommender Models' Performance* / F.C. Taskin [et al.] // *arXiv:2406.18286*. – 2024.
4. *Cogent Infotech. Synthetic Data Explosion: How 2026 Reduces Data Costs by 70%* [Electronic resource]. – 2025. – Mode of access: <https://www.cogentinfo.com>.
5. Пискун, Е.С. Ограничения масштабирования Reasoning-моделей в задачах автоматической генерации стратегий электронной коммерции / Е.С. Пискун, Д.В. Нуансенгси // *Вестник ГрДУ*. – 2025. – Т. 15, № 3.
6. Xu, L. *Modeling Tabular Data using Conditional GAN* / L. Xu [et al.] // *NeurIPS 2019*. – *arXiv:1907.00503*.
7. *Shaped AI. Criteo Dataset: Tackling Large-Scale CTR Prediction* [Electronic resource]. – 2025. – Mode of access: <https://shaped.ai>.
8. Shumailov, I. *AI models collapse when trained on recursively generated data* / I. Shumailov [et al.] // *Nature*. – 2024. – Vol. 631.
9. Seddik, M. *How Bad is Training on Synthetic Data?* / M. Seddik [et al.] // *arXiv:2404.05090*. – 2024.
10. Shojaei, P. *The Illusion of Thinking* / P. Shojaei [et al.] // *Apple*. – 2025.
11. Chivukula, V. *Use of Differential Privacy to Enable Optimization of Ads* / V. Chivukula // *IJIRCT*. – 2022. – Vol. 8, Iss. 5.
12. *Differentially Private Synthetic Data Release for Topics API Outputs* // *arXiv:2506.23855*. – 2025.
13. WEF. *Synthetic Data: The New Data Frontier* / World Economic Forum. – 2025.

UDC 004.8:339.1

SYNTHETIC DATA FOR TRAINING ADVERTISING MODELS IN E-COMMERCE: GENERATION METHODS, PRIVACY, AND LIMITATIONS

Nuansengsy D.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Piskun G.A. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. Methods of synthetic data generation (CTGAN, TVAE, diffusion models) for training advertising CTR models in e-commerce are investigated. It is established that augmentation with synthetic samples improves AUC by 2.9%, while complete replacement leads to model collapse (–8.6% AUC). The necessity of a hybrid approach with differential privacy is substantiated.

Keywords: synthetic data, CTGAN, CTR prediction, e-commerce, differential privacy, model collapse, data augmentation.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ПО ИНФОРМАТИВНЫМ ПАРАМЕТРАМ МЕТОДОМ ПОРОГОВОЙ ЛОГИКИ

Романович С.А., Сурков В.Д., Тихонович А.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Боровиков С.М. – к. т. н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Обсуждается подход к индивидуальному прогнозированию класса надёжности изделий электронной техники для заданной наработки по значениям информативных параметров прогнозируемого экземпляра. Известные методы прогнозирования требуют сложных вычислений по определению прогнозирующей функции для каждого экземпляра. В качестве альтернативы может использоваться метод пороговой логики, основанный на преобразовании значений информативных параметров в двоичный код и принятии решения о классе надёжности прогнозируемого экземпляра по логической таблице без проведения вычислений.

Ключевые слова: прогнозирование, надёжность, информативные параметры, пороговая логика.

Введение. Известные методы индивидуального прогнозирования по информативным параметрам (кратко – признакам), такие как методы статистических решений и потенциальных функций [1] при числе признаков $k > 2$ перед принятием решения о классе надёжности каждого экземпляра для заданной наработки (K_1 – класс надёжных, K_2 – класс потенциально ненадёжных экземпляров) предполагают выполнение сложных математических вычислений по определению прогнозирующей функции, по значению которой принимают решение о классе надёжности прогнозируемого экземпляра. Необходимость выполнения вычислений ограничивает внедрение этих методов в производственную деятельность предприятий. Использование методов в условиях производства целесообразно лишь на основе применения вычислительной техники. Другие же, более простые методы, во многих случаях не позволяют достичь допустимых ошибок прогнозирования. Актуальной является задача разработки и внедрения простых методов, но обеспечивающих достаточную достоверность прогнозирования.

Основная часть. Простым и в то же время эффективным является метод индивидуального прогнозирования, основанный на принципах пороговой логики [1, 2].

Суть метода пороговой логики состоит в преобразовании значений признаков, полученных при измерении для j -го экземпляра, в двоичный код (единица или ноль) и принятии решения о классе надёжности этого экземпляра по набору (комбинации) двоичных чисел. При k признаках, используемых для прогнозирования, количество всех возможных наборов T , построенных из двоичных чисел, определяется выражением $T = 2^k$. Поэтому прогнозирующее правило для этого метода может быть представлено простой логической таблицей с числом строк не более T . Таблица может использоваться непосредственно в наглядной форме или храниться в запоминающих устройствах.

Преобразование значений признаков $x_1, \dots, x_k$ в двоичные числа $z_1, \dots, z_k$, называемые далее сигналами, выполняется по соотношениям [1, 2]

$$\left. \begin{aligned} z_i &= 1, \text{ если } x_i \geq x_{i0} \\ z_i &= 0, \text{ если } x_i < x_{i0} \end{aligned} \right\} \text{ при } m_{i1} > m_{i2}; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} z_i &= 1, \text{ если } x_i \leq x_{i0} \\ z_i &= 0, \text{ если } x_i > x_{i0} \end{aligned} \right\} \text{ при } m_{i1} < m_{i2}, \quad (2)$$

где x_{i0} – пороговое значение i -го признака;

m_{is} – среднее значение i -го признака в начальный момент времени для экземпляров класса надёжности K_s ($S = 1; 2$).

Прогнозирующее правило для данного метода прогнозирования задаётся соотношением

$$R = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^k \alpha(z_i) \geq P_0; \\ 0, & \text{если } \sum_{i=1}^k \alpha(z_i) < P_0, \end{cases} \quad (3)$$

где R – выходной двоичный сигнал (пороговая функция), равный единице для класса надёжных экземпляров (K_1) и нулю – для класса потенциально ненадёжных экземпляров (K_2);

$\alpha(z_i)$ – вес i -го двоичного сигнала, выбираемый в зависимости от того, какое значение (единица или нуль) принял i -й признак по результатам применения условий (1) или (2);

P_0 – порог (критерий) разделения классов, вещественное число.

Вес $\alpha(z_i)$ i -го двоичного сигнала характеризует ценность сигнала z_i для процедуры прогнозирования и определяется соотношением [1]

$$\alpha(z_i) = \begin{cases} P(K_1 | z_i = 1), & \text{если } z_i = 1; \\ P(K_1 | z_i = 0), & \text{если } z_i = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $P(K_1 | z_i = \xi)$ – оценка вероятности того, что ИЭТ принадлежит к классу K_1 при условии, что двоичный сигнал z_i принял значение $z_i = \xi$; $\xi = 1, 0$.

Оценку вероятностей $P(K_1 | z_i = 1)$ и $P(K_1 | z_i = 0)$ получают по результатам испытаний экземпляров обучающей выборки, используя следующие выражения:

$$P(K_1 | z_i = 1) = \frac{n(K_1 | z_i = 1)}{n(z_i = 1)}, \quad (5)$$

$$P(K_1 | z_i = 0) = \frac{n(K_1 | z_i = 0)}{n(z_i = 0)}, \quad (6)$$

где $n(K_1 | z_i = \xi)$ – количество экземпляров класса K_1 в обучающей выборке, для которых двоичный сигнал z_i принял значение $z_i = \xi$; $\xi = 1, 0$;

$n(z_i = \xi)$ – общее количество экземпляров в обучающей выборке, для которых двоичный сигнал z_i принял значение $z_i = \xi$; $\xi = 1, 0$.

Для определения порогового значения i -го признака можно использовать способ, состоящий в выборе в качестве значения x_{i0} средней точки между средними значениями

(математическими ожиданиями) m_1 и m_2 признака x , соответствующими классам надёжности K_1 и K_2 для экземпляров обучающей выборки в начальный момент времени [1, 2].

Преобразование признаков $x_1, \dots, x_k$ экземпляров обучающей выборки в двоичные сигналы $z_1, \dots, z_k$ выполняется по выражениям (1) или (2).

Для определения веса $\alpha(z_i)$ i -го двоичного сигнала с учётом выбранного порогового значения x_0 подсчитываются по соотношениям (5) и (6) оценки вероятностей $P(K_1 | z_i = 1)$ и $P(K_1 | z_i = 0)$. Они в соответствии с выражением (4) принимаются в качестве веса $\alpha(z_i)$.

Значение прогнозирующей функции $F(z_1^{(j)}, \dots, z_k^{(j)})$, соответствующее j -му экземпляру обучающей выборки, определяется по формуле [1–4]

$$F(z_1^{(j)}, \dots, z_k^{(j)}) = \sum_{i=1}^k \alpha(z_i^{(j)}), \quad (7)$$

где $\alpha(z_i^{(j)})$ – значение веса i -го двоичного сигнала z_i , соответствующее j -му экземпляру обучающей выборки.

Для оценки вероятности принятия правильных решений используют выражение

$$P_{\text{прав}} = \frac{n_{11} + n_{22}}{n}, \quad (8)$$

где n_{11} , n_{22} – количество правильно распознанных экземпляров соответственно классов надёжности K_1 и K_2 в обучающей выборке;

n – объём обучающей выборки.

Для определения порога разделения классов P_0 задаются несколькими точками из области определения прогнозирующей функции $F(z_1^{(j)}, \dots, z_k^{(j)})$ для изделий обучающей выборки. Для каждой выбранной точки, пользуясь правилом, задаваемым соотношением (3), подсчитывают по формуле (8) вероятность принятия правильных решений $P_{\text{прав}}$. В качестве искомого порога разделения классов P_0 принимают значение, которое отвечает условию

$$P_{\text{прав}} \rightarrow \max.$$

Представление прогнозирующего правила логической таблицей, используемой для прогнозирования, осуществляется следующим образом [1]. Для всех теоретически возможных наборов двоичных сигналов $z^1, z^2, \dots, z^k$ подсчитываются по выражению (7) значения прогнозирующей функции $F(z_1^{(j)}, \dots, z_k^{(j)})$. Используя построенное прогнозирующее правило вида (3), определяют, какому классу соответствует тот или иной набор двоичных сигналов.

Заключение. Метод позволяет существенно упростить процедуру прогнозирования однотипных экземпляров, не участвовавших в обучающем эксперименте, за счёт преобразования значений признаков в двоичный код и использования наглядных логических таблиц. Значимость работы состоит в возможности индивидуального прогнозирования класса надёжности ИЭТ без выполнения вычислений прогнозирующей функции.

Список литературы

1. Боровиков С.М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадёжных изделий электронной техники. – М. : Новое знание, 2013. – 343 с.
2. Метод прогнозирования надёжности изделий электронной техники / С.М. Боровиков, А.В. Емельянов, А.А. Хмыль, А.И. Бересневич // Доклады НАН Беларуси. – 2006. – Т. 50, № 4. – С. 105–109.
3. Прогнозирование класса надёжности изделий электронной техники методом преобразования информативных параметров в дискретный код / В.О. Казюцц, С.М. Боровиков, М.П. Батура, Е.Н. Шнейдеров // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 91–97. DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-1-91-97.
4. Казюцц В.О., Боровиков С.М., Шнейдеров Е.Н. Эвристическая модель прогнозирования работоспособности полупроводниковых приборов // Доклады БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 1. – С. 92–100.

UDC 621.382.019.3

PREDICTING THE RELIABILITY OF ELECTRONIC PRODUCTS BASED ON INFORMATION PARAMETERS USING THE THRESHOLD LOGIC METHOD

Romanovich S.A. Surkov V.D., Tikhonovich A.V.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk,
Republic of Belarus*

Borovikov S.M. – Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor of the Department of ICSD

Annotation. This article discusses an approach to individually predicting the reliability class of electronic products for a given operating life based on the values of the predicted component's informative parameters. Known prediction methods require complex calculations to determine the predictive function for each component. Alternatively, a threshold logic method can be used, based on converting the informative parameter values into binary code and making a decision on the predicted component's reliability class based on a logic table without performing calculations.

Keywords: forecasting, reliability, informative parameters, threshold logic.

RSVP В ОРГАНИЗАЦИИ КОРПОРАТИВНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ: ВЛИЯНИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАНИРОВАНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА

Цымбал Н.О.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Верхов К.А. – ассистент кафедры ПИКС

Аннотация. Рассмотрено применение функции *RSVP* для управления участием в корпоративных мероприятиях. Предложены показатели эффективности планирования и модель прогнозирования явки на основе ответов участников. Сформулированы направления развития программного средства: напоминания, управление вместимостью, интеграции с корпоративными сервисами, аналитика и меры защиты персональных данных.

Ключевые слова: *RSVP*, корпоративные мероприятия, планирование, подтверждение участия, прогноз явки, напоминания, вместимость, аналитика

Введение. Корпоративные мероприятия характеризуются переменными затратами, зависящими от числа участников, и ограничениями по вместимости площадки. При отсутствии подтверждений участие сотрудников оценивается приближённо, что повышает риск перерасхода ресурсов либо дефицита мест и сервисов. Функция *RSVP* как запрос ответа на приглашение обеспечивает сбор статусов участия и формирует данные для управляемого планирования мероприятия [1].

Основная часть. Механизм *RSVP* задаётся в формате *iCalendar* как параметр приглашения, указывающий ожидаемость ответа приглашённого, а обмен ответами и изменениями события между организатором и участниками описывается протоколом *iTIP* [2]. Наличие стандартизированного обмена позволяет строить программное средство как надстройку над корпоративными календарями: участникам не требуется отдельный канал для подтверждения, а организатор получает согласованные статусы в карточке события и может отслеживать ответы участников [3].

Для оценки влияния *RSVP* на эффективность планирования предложен набор показателей, согласованный с практикой подготовки корпоративных событий:

- доля ответов до дедлайна подтверждения;
- точность прогноза явки;
- доля неявки среди подтвердивших участие;
- трудоёмкость подготовки, выраженная временем на сбор и актуализацию списков приглашённых.

Прогнозирование явки на основе *RSVP* целесообразно выполнять по модели, использующей агрегированные статусы ответов. Ожидаемое число участников определяется выражением:

$$N_{\text{подтв}} + k \cdot N_{\text{предв}} + m \cdot N_{\text{без ответа}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{подтв}}$ – число подтвердивших участие;

$N_{\text{предв}}$ – число участников с предварительным согласием;

$N_{\text{без ответа}}$ – число приглашённых без ответа к моменту расчёт.

Коэффициенты k и m оцениваются по истории мероприятий как средняя доля фактической явки для соответствующих групп. Точность прогнозирования фиксируется относительной ошибкой:

$$\varepsilon = \frac{|N_{\text{факт}} - N_{\text{прогн}}|}{N_{\text{факт}}} \times 100\%, \quad (2)$$

Показатели обеспечивают измеримую связь между статусами *RSVP* и планируемыми ресурсами: при поступлении новых ответов пересчитываются $N_{\text{прогн}}$ и ε , что позволяет корректировать закупки, резерв мест и объём сервисов без ручных пересчётов.

Снижение неявки и рост доли ответов до дедлайна достигаются автоматизацией коммуникаций. Для *RSVP*-решения критичны сценарии напоминаний: начальное уведомление, напоминание перед дедлайном, повторная верификация участия перед датой проведения. Экспериментальные исследования по *SMS*-напоминаниям показывают, что корректное содержание сообщений уменьшает долю пропусков без дополнительных затрат на организацию процесса [4]. В корпоративном контуре данный вывод переносится на уведомления электронной почты и корпоративных мессенджеров: напоминания направляются только неотвечившим либо изменившим решение, а частота и сроки задаются политикой организации.

Для мероприятий с ограниченной вместимостью *RSVP* должен быть связан с управлением лимитами и очередью. Практика использования листа ожидания в системах управления событиями предусматривает фиксацию заявок сверх лимита и предоставление мест при освобождении ресурсов [5]. На этой основе в программном средстве предлагается поддержка состояния «лист ожидания» и правил замены: переход из очереди в список участников выполняется автоматически после отказа либо отмены участия. Дополнительно фиксируется фактическое присутствие участника на мероприятии, что связывает «ответ» и «результат» и повышает качество оценок коэффициентов k и m .

Важным направлением развития является интеграция *RSVP*-модуля с корпоративной инфраструктурой. Синхронизация с календарём обеспечивает единый жизненный цикл приглашения и ответа [2], а также гарантирует доступность статусов участия организатору и участникам в привычной среде [3]. Интеграция со справочником сотрудников позволяет поддерживать актуальный состав приглашённых и сегментацию по подразделениям и ролям, а единая аутентификация снижает риск несанкционированного доступа к ответам. Экспорт и импорт приглашений на базе *iCalendar* повышают совместимость при взаимодействии с внешними календарными системами [1].

На основе накопленных данных *RSVP* и фактической явки формируется аналитика: динамика ответов по времени, значения коэффициентов k и m , причины отказов, распределение ошибки ε . Для повторяющихся форматов корпоративных мероприятий аналитика может быть дополнена методами машинного обучения. Публикации по прогнозированию посещаемости событий демонстрируют применимость *ML*-моделей для повышения точности прогнозов при большом числе решений «прийти/не прийти» и наличии истории наблюдений [6]. В корпоративном программном средстве целесообразен двухуровневый подход: базовый прогноз по формуле (1) и уточнение прогноза для критичных по стоимости ошибок мероприятий при накоплении достаточного массива данных.

Отдельно учитывается конфиденциальность: статусы участия и история уведомлений относятся к персональным данным, поскольку связаны с идентифицируемым сотрудником. Закон Республики Беларусь № 99-З устанавливает требования законности и соразмерности обработки персональных данных, а также обязанности по обеспечению их защиты [7]. Для *RSVP*-системы это означает разграничение прав доступа, журналирование действий, минимизацию собираемых атрибутов, регламент сроков хранения статистики и возможность обезличивания данных после завершения мероприятия при отсутствии оснований для дальнейшего хранения.

Таблица 1 – Направления модернизации RSVP-модуля и влияние на показатели планирования

Направление	Реализация в ПО	Влияние на метрики	Приоритет
Дедлайны и напоминания	Сценарии уведомлений, правила адресации	Рост доли ответов, снижение неявки	Высокий
Расширенная модель статусов	История изменений, отметка присутствия	Снижение ε , уточнение k и m	Высокий
Управление вместимостью	Лимиты мест, лист ожидания, замены	Заполнение мест, снижение отказов	Высокий
Интеграции	Календарь, справочник сотрудников, SSO	Сокращение времени подготовки	Средний

Заключение. RSVP как механизм подтверждения участия снижает неопределённость планирования корпоративных мероприятий за счёт стандартизированного сбора ответов и интеграции с календарной инфраструктурой [1]. Предложенные показатели эффективности и модель прогнозирования явки, а также направления развития программного средства обеспечивают измеримый контур управления участием: повышение доли ответов, снижение ошибки прогноза, сокращение трудозатрат и соблюдение требований к защите персональных данных [7].

Список литературы

1. RFC 5545: Internet Calendaring and Scheduling Core Object Specification (iCalendar). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://data.ietf.org/doc/html/rfc5545> – Дата доступа: 05.03.2026.
2. RFC 5546: iCalendar Transport-Independent Interoperability Protocol (iTIP). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://data.ietf.org/doc/html/rfc5546> – Дата доступа: 05.03.2026.
3. Attendees can see others' responses to a meeting invitation. Microsoft Support. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://support.microsoft.com/en-us/office/attendees-can-see-others-responses-to-a-meeting-invitation-f51437e5-352c-4223-b7d8-7020cd71f3c8> – Дата доступа: 05.03.2026.
4. Hallsworth M., Berry D., Sanders M. et al. Stating Appointment Costs in SMS Reminders Reduces Missed Hospital Appointments: Findings from Two Randomised Controlled Trials // PLOS ONE. 2015. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0137306> – Дата доступа: 05.03.2026.
5. How to set up an event waitlist. Eventbrite Help Center. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eventbrite.com/help/en-us/articles/811539/how-to-set-up-an-event-waitlist/> – Дата доступа: 05.03.2026.
6. Nguyen J. K., Karg A., Valadkhani A., McDonald H. Predicting individual event attendance with machine learning // Applied Economics. 2022. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ideas.repec.org/a/taf/applec/v54y2022i27p3138-3153.html> – Дата доступа: 05.03.2026.
7. О защите персональных данных: Закон Республики Беларусь от 07.05.2021 № 99-3. Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H12100099> – Дата доступа: 05.03.2026.

UDC 004.9:005.7

RSVP IN CORPORATE EVENT MANAGEMENT: IMPACT ON PLANNING EFFICIENCY AND DIRECTIONS FOR SOFTWARE DEVELOPMENT

Tsymbal N.O.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Verkhov K.A. – assistant of the department of ICSD

Annotation. The RSVP function is considered as a mechanism for participation management in corporate events. Planning efficiency metrics and an attendance forecasting model based on participants' responses are proposed. Key software development directions are formulated, including reminders, capacity management, integration with corporate services, analytics, and personal data protection measures.

Keywords: RSVP, corporate events, planning, participation confirmation, attendance forecast, reminders, capacity, analytics

ОПТИМИЗАЦИЯ ОБЛАЧНЫХ ХРАНИЛИЩ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ДЕДУПЛИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Вегера К.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Марков А.Н. – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры информатики

Аннотация. Работа посвящена проблеме избыточности данных в облачных сервисах хранения медиаконтента. Предложена архитектура программного комплекса, реализующего механизм дедупликации изображений на основе перцептивного хеширования (dHash). Описан алгоритм взаимодействия клиентской части, базы данных PostgreSQL и объектного хранилища, позволяющий исключить повторную запись визуально идентичных файлов. Приведена методика оценки эффективности сжатия хранилища.

Ключевые слова: облачные вычисления, дедупликация, архитектура ПО, PostgreSQL, оптимизация ресурсов, dHash.

Введение. Современные IT-инфраструктуры сталкиваются с экспоненциальным ростом объемов неструктурированных данных. По статистике, значительную долю дискового пространства занимают дубликаты изображений [1], возникающие при пересылке контента, резервном копировании или незначительном изменении форматов. Классификация моделей облачных вычислений [2] позволяет выделить специализированные сервисы хранения как критически важный компонент IaaS. Традиционные методы дедупликации, основанные на криптографических хешах (MD5, SHA-256), неэффективны для медиаконтента, так как изменение разрешения или метаданных файла приводит к изменению хеш-суммы, что вынуждает систему хранить идентичные по содержанию копии.

Целью работы является проектирование архитектуры облачного сервиса, обеспечивающего минимизацию затрат на хранение данных (IaaS) за счет выявления и исключения нечетких дубликатов.

Методика и алгоритмы. Для решения задачи предложено использование методики дедупликации на стороне сервера (target-based deduplication) с использованием перцептивных хешей. В качестве базового алгоритма выбран Difference Hash (dHash) [3], который формирует цифровой отпечаток изображения на основе градиентов яркости между соседними пикселями. Процесс генерации хеша dHash состоит из четырех последовательных этапов, каждый из которых направлен на удаление избыточной информации (шума, детализации, цвета):

1. Масштабирование (Resizing). Изображение сжимается до размера 9x8 пикселей (всего 72 пикселя). Использование нечетного количества столбцов (9) необходимо для обеспечения перекрытия при вычислении разницы между соседними точками.

2. Обесцвечивание. Изображение преобразуется в оттенки серого, что позволяет абстрагироваться от цветовой гаммы и сосредоточиться только на структурной информации (форме объектов).

3. Вычисление разницы. Для каждой строки пикселей y вычисляется разница яркости между пикселем x и $x + 1$ пикселем.

4. Построение битовой строки. Если яркость пикселя $P(x) > P(x + 1)$, то бит хеша равен 1, иначе – 0. В результате формируется 64-битное число (8x8), которое является компактным цифровым следом изображения.

Выбор dHash обусловлен его устойчивостью к масштабированию изображения и высокой скоростью генерации (менее 6 мс на изображение), что критически важно для высоконагруженных систем. Критерием идентичности изображений служит расстояние Хэмминга (d_H). Если $d_H \leq 5$, изображения считаются визуальными копиями.

Архитектура системы. Разработанное решение базируется на принципе разделения метаданных и бинарных данных (Blob). Логическая схема хранения реализуется с использованием СУБД PostgreSQL и S3-совместимого хранилища. Процесс загрузки файла включает следующие этапы:

1. Генерация отпечатка. Сервис принимает изображение и вычисляет его перцептивный хеш (64-битное число).

2. Поиск в индексе. Выполняется запрос к таблице `images_hash` в БД PostgreSQL. Благодаря использованию специализированных индексов (GIST/SP-GIST для битовых строк), поиск похожих хешей выполняется за логарифмическое время. Для хранения 64-битных хешей в PostgreSQL используется тип данных `bit(64)`, который позволяет выполнять побитовые операции непосредственно на уровне СУБД, минимизируя передачу данных между приложением и базой. Расстояние Хэмминга между двумя хешами A и B вычисляется как количество единичных битов в результате операции XOR ($A \oplus B$). Для оптимизации выборки на больших объемах данных (миллионы записей) стандартный B-tree индекс неэффективен. Вместо него предлагается использовать специализированные BK-деревья (Burkhard-Keller trees), которые позволяют эффективно отсекают ветви дерева поиска, где расстояние заведомо превышает заданный порог (*threshold*). Это снижает сложность поиска с линейной $O(N)$ до логарифмической $O(\log_2 N)$.

3. Принятие решения. Сценарий А (дубликат найден): если в БД найден хеш с $d_H \leq threshold$, физическая загрузка файла в S3 отменяется. В таблице `user_files` создается новая запись, ссылающаяся на уже существующий `file_id`. Счетчик ссылок (reference count) для оригинала увеличивается. Сценарий Б (уникальный контент): Файл загружается в S3, ему присваивается уникальный ID, а хеш сохраняется в индексе.

Графически алгоритм работы подсистемы представлен на рисунке 1:

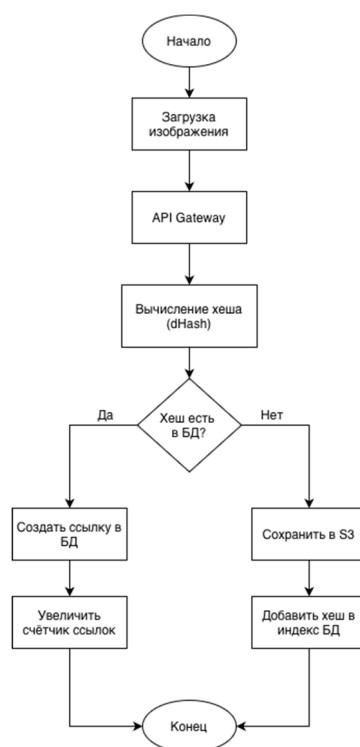


Рисунок 1 – Алгоритм работы подсистемы дедупликации при загрузке данных

Такой подход реализует модель Content-Addressable Storage (CAS), где адресация контента происходит на основе его содержимого, а не имени файла.

Обработка коллизий. При использовании 64-битного хеширования теоретически возможны коллизии, когда разные изображения имеют одинаковый dHash (особенно при сильном размытии или монотонном фоне). Вероятность такого события для фотографий

крайне мала (2^{-64}), однако для повышения надежности системы в архитектуру введен механизм верификации. В случае обнаружения дубликата (расстояние Хэмминга равно 0) система выполняет дополнительную проверку: сравнивает размеры файлов (в байтах) и, при необходимости, вычисляет быстрый криптографический хеш (CRC32) для первых 4 КБ файла. Это позволяет с вероятностью, близкой к 100%, исключить ложные срабатывания (False Positives), не прибегая к полному побитовому сравнению файлов.

Оценка эффективности. Эффективность предлагаемой архитектуры оценивается коэффициентом дедупликации (K_{dedup}), который показывает отношение логического объема данных к физическому, и рассчитывается по формуле 1:

$$K_{dedup} = \frac{V_{logical}}{V_{physical}} = \frac{\sum_{i=1}^N Size(f_i)}{Size(Unique) + Size(Meta)}, \quad (1)$$

где $V_{logical}$ – суммарный объем файлов, загруженных пользователями, ГБ;

$V_{physical}$ – реально занимаемое место на дисках, ГБ.

Предварительное моделирование на тестовой выборке из 10 000 изображений (включая ресайзы и пересохранения) показало, что внедрение данного алгоритма позволяет достичь коэффициента $K_{dedup} \approx 1.6$, что эквивалентно экономии 30–45% дискового пространства.

Заключение. Предложена архитектура облачного сервиса хранения, использующая алгоритм dHash для оптимизации использования ресурсов. Переход от прямого хранения файлов к системе ссылок на уникальные контентные единицы позволяет существенно снизить требования к инфраструктуре хранения (IaaS) и уменьшить избыточный сетевой трафик, не снижая качество обслуживания пользователей.

Список литературы

1. Армбруст М. Облачные вычисления: взгляд сверху // Коммуникации АСМ. – 2010. – Т. 53, № 4.
2. Вакеро Л. М. Определение и классификация облачных вычислений // Вестн. информатики. – 2011. – Т. 28.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2012.

UDC 004.932:004.75

OPTIMIZATION OF CLOUD DATA STORAGE USING IMAGE DEDUPLICATION ALGORITHMS

Viahera K.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Markov A.N. – Master of Sci. (M. of Sci.), Senior Lecturer at the Department of Informatics

Annotation. The paper considers the problem of data redundancy in cloud media storage services. An architecture of a software complex implementing an image deduplication mechanism based on perceptual hashing (dHash) is proposed. The interaction algorithm between the client part, PostgreSQL database, and object storage, allowing to exclude re-recording of visually identical files, is described. A methodology for assessing storage compression efficiency is presented.

Keywords: cloud computing, deduplication, software architecture, PostgreSQL, resource optimization, dHash.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДА ПОЛНОГО ПЕРЕБОРА СОСТОЯНИЙ И МЕТОДА СВЕРТКИ ПРИ ОЦЕНКЕ НАДЁЖНОСТИ РЕЗЕРВИРУЕМОГО УЗЛА СО СМЕШАННЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Зацепина М.И., Силенкова Д.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Боровиков С.М. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Эталонное значение получено методом полного перебора 81 возможной комбинации состояний элементов с учетом отказов по типу обрыва и короткого замыкания. Результат сопоставлен с расчетом, выполненным методом свертки по правилам последовательного и параллельного соединения. Совпадение полученных значений вероятности безотказной работы подтверждает практическую применимость метода свертки при анализе резервируемых узлов.

Ключевые слова: надежность, резервирование, смешанное соединение, обрыв, короткое замыкание, модель с тремя состояниями, метод свертки, полный перебор состояний.

Введение. При анализе надёжности резервируемых электронных узлов существенное влияние на результат оказывают структура соединения элементов и характер их отказов. Для элементов, у которых вероятности отказов по типу обрыва и короткого замыкания сопоставимы, широко применяются смешанные последовательно-параллельные схемы. Для таких структур применяются различные методы расчета вероятности безотказной работы, отличающиеся вычислительной сложностью. В настоящей работе выполняется сравнение метода полного перебора состояний и метода свертки на примере двух схем резервируемого узла с одинаковыми исходными параметрами.

Основная часть. Рассматривается резервируемый узел, состоящий из четырёх одинаковых элементов, соединенных по смешанной последовательно-параллельной схеме. Электрические схемы исследуемых вариантов приведены на рисунке 1.

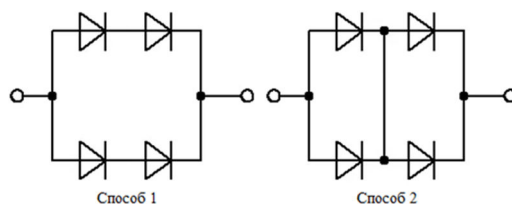


Рисунок 1 – Схемы резервируемого узла: способ 1 – последовательно-параллельная схема; способ 2 – параллельно-последовательная схема.

Каждый элемент узла описывается моделью с тремя возможными состояниями: работоспособное состояние, отказ по типу обрыва и отказ по типу короткого замыкания. Для заданного момента времени вероятности состояний элемента удовлетворяют условию нормировки, которое определяется по формуле 1.

$$p + q_0 + q_{кз} = 1 \quad (1)$$

где p – вероятность работоспособного состояния элемента;

q_0 – вероятность отказа по типу обрыва;

$q_{кз}$ – вероятность отказа по типу короткого замыкания.

В работе используются значения p , q_0 , $q_{кз}$ приведенные ниже в в таблице 1.

Таблица 1 – Вероятности состояний элемента

Обозначение	Значение
p	0,8
$q_{кз}$	0,1
q_o	0,1

В качестве эталонного подхода используется метод полного перебора состояний. Поскольку пространство состояний одного элемента содержит три состояния, для узла из четырех элементов общее число возможных состояний определяется следующим выражением:

$$N = 3^4 = 81. \quad (2)$$

Каждому состоянию узла соответствует комбинация состояний отдельных элементов $\{s_1, s_2, s_3, s_4\}$. Вероятность i -го состояния определяется произведением вероятностей состояний элементов определяется по формуле:

$$P(i) = P(s_1) \cdot P(s_2) \cdot P(s_3) \cdot P(s_4), \quad (3)$$

где $P(s_j)$ – вероятность состояния j -го элемента.

Суммарная вероятность безотказной работы узла определяется выражением:

$$P_{\Sigma} = \sum_{i \in \Omega_{\text{раб}}} P(i), \quad (4)$$

где $\Omega_{\text{раб}}$ – множество работоспособных состояний узла.

Для исключения ручного перечисления 81 комбинации перебор реализован в виде автоматизированной табличной модели на основе троичного представления номера состояния. Работоспособность состояния определяется логическим условием, соответствующим структуре схемы. По результатам расчетов получено значение $P_{\Sigma} = 0,944$, данное значение далее используется как эталонное.

В качестве альтернативы использует метод свертки до эквивалентного элемента, основанный на последовательной замене участков схемы эквивалентными элементами с сохранением вероятностных характеристик. Для двух последовательно соединенных элементов вероятность короткого замыкания эквивалентного элемента определяется выражением:

$$q_{кз,э} = q_{кз1} \cdot q_{кз2}, \quad (5)$$

где $q_{кз1}, q_{кз2}$ – вероятности короткого замыкания первого и второго элементов.

Вероятность отсутствия обрыва при последовательном соединении определяется по формуле:

$$1 - q_{o,э} = (p_1 + q_{кз1}) \cdot (p_2 + q_{кз2}), \quad (6)$$

откуда вероятность отказа по типу обрыва равна:

$$q_{o,э} = 1 - (p_1 + q_{кз1}) \cdot (p_2 + q_{кз2}), \quad (7)$$

Вероятность работоспособного состояния эквивалентного элемента определяется из условия нормировки по формуле (1). Для параллельного соединения вероятность отказа по типу обрыва эквивалентного элемента определяется выражением:

$$q_{0,э} = q_{01} \cdot q_{02}, \quad (8)$$

Вероятность короткого замыкания эквивалентного элемента вычисляется по формуле:

$$q_{кз,э} = 1 - (p_1 + q_{01}) \cdot (p_2 + q_{02}). \quad (9)$$

Применение указанных соотношений к рассматриваемым схемам со значениями $p = 0,8$; $q_0 = 0,1$; $q_{кз} = 0,1$ приводит к одинаковому итоговому значению вероятности безотказной работы узла $P_{\Sigma} = 0,944$, что полностью совпадает с результатом метода полного перебора. Совпадение результатов объясняется тем, что на каждом этапе свертки сохраняется корректное вероятностное описание эквивалентного элемента, а итоговая величина определяется только структурой соединения и исходными вероятностями состояний.

Заключение. Выполнено сравнение метода полного перебора состояний и метода свёртки при оценке вероятности безотказной работы резервируемого узла со смешанным соединением элементов. Оба подхода дают одинаковый численный результат. Полный перебор обеспечивает эталонную точность, но обладает экспоненциальной сложностью. Метод свёртки эквивалентен по результату и требует значительно меньших вычислительных затрат, поэтому предпочтителен для узлов большой размерности.

Список литературы

1. Боровиков С.М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности. – Минск: Дизайн ПРО, 1998. – 336 с.
2. Боровиков С.М., Цырельчук И.Н., Троян Ф.Д. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/25651>. Дата доступа: 05.01.2026.
3. Надёжность в технике. Термины и определения: ГОСТ 27.002-2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293754/4293754027.pdf>. Дата доступа: 06.01.2026.
4. Надёжность в технике. Структурная схема надёжности: ГОСТ Р МЭК 61078-2021 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data/793/79355.pdf>. Дата доступа: 06.01.2026.

UDC 621.3.019.3

COMPARISON OF COMPLETE STATE ENUMERATION AND CONVOLUTION METHODS FOR RELIABILITY ASSESSMENT OF A REDUNDANT NODE WITH MIXED INTERCONNECTION OF ELEMENTS

Zatsepina M.I., Silenkova D.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Borovikov S.M. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. A reference value is obtained by complete enumeration of 81 possible combinations of element states accounting for open circuit and short circuit failures. The result is compared with a calculation performed using the convolution method based on series and parallel connection rules. The coincidence of the obtained reliability values confirms the applicability of the convolution method for the analysis of more complex redundant structures.

Keywords: reliability, redundancy, mixed interconnection, open circuit, short circuit, three state element model, convolution method, complete state enumeration.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ И КОРРЕКЦИЯ МУЗЫКАЛЬНОГО ФОНА В ОБЩЕСТВЕННЫХ МЕСТАХ НА ОСНОВЕ ПСИХОАКУСТИЧЕСКИХ ДЕСКРИПТОРОВ И ИНСТРУМЕНТОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Зинковская Е.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Левченя Ж.Б. – к.т.н. доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Аргументируется влияние музыкального фона в общественных местах на поведение посетителей, ссылаясь на проведенные эксперименты. Приводится описание инструментов обработки и анализа аудиофайлов, используемых для автоматизированного подбора музыкальных плейлистов.

Ключевые слова: музыкальный фон, аудиофайл, *ffmpeg*, *librosa*, поведение посетителей, цифровая обработка сигналов, музыкальный анализ

Введение. В условиях высокой конкуренции в сфере услуг музыка рассматривается не только как фон, но и как инструмент управления поведением посетителей. Исследования показывают, что параметры музыкального сопровождения влияют на эмоциональное состояние людей, длительность их пребывания и активность [1]. Отсутствие грамотного подбора музыкального фона может негативно сказаться на бизнесе. Современный уровень цифровизации позволяет использовать специализированное программное обеспечение для анализа, коррекции и оптимального подбора музыкального сопровождения.

Основная часть. Влиянию музыки на посетителей посвящено множество исследований. Эксперимент 1980 года в супермаркете США показал, что темп музыки влияет на скорость движения посетителей: быстрый темп ускоряет передвижение, медленный – замедляет, при этом снижение скорости связано с увеличением объема продаж [1]. Аналогичные результаты получены для ресторанов и кафе: при медленной музыке посетители дольше остаются и заказывают больше напитков [2]. Исследования также показали, что музыка снижает психологические барьеры между посетителем и заведением, а жанр и национальная принадлежность композиций влияют на выбор товаров [2].

Для качественного и единообразного воспроизведения музыкального фона, необходимо обеспечить предварительную коррекцию аудио. Это возможно благодаря использованию *FFmpeg* – набора инструментов командной строки и библиотек для обработки аудио- и видеофайлов. Одним из ключевых этапов коррекции является нормализация громкости различных композиций к единому стандарту. Для этого применяется фильтр *loudnorm*, реализующий нормализацию в соответствии со стандартом *EBU R128*. Для этого могут использоваться такие параметры, как [3]:

- *i* – интегральный уровень громкости (от -70 до -5, по умолчанию -24);
- *lra* – целевой диапазон уровня громкости (от 1 до 50, по умолчанию 7);
- *tp* – максимальный уровень пикового сигнала (от -9 до 0, по умолчанию -2).

Для уменьшения уровня шума можно использовать фильтр *afftdn* [3]. Например, параметр *noise_reduction* устанавливает уровень шумоподавления (в дБ), *noise_floor* – уровень шумового порога, и другие [3].

Atilt – фильтр для аудиостримов. Параметры: *freq* настраивает частоту, *level* – уровень громкости. Для получения информации о резкости звука можно использовать параметр *sharpness* фильтра *sr_am*; для яркости параметр *brightness* фильтра *despill* [3].

Для извлечения аудиодескрипторов и анализа музыкального сигнала можно применять библиотеку *Librosa* для *Python*. Одной из ключевых возможностей является извлечение темпа музыкальной композиции с использованием функции *beat_track()* [4].

Для анализа яркости звука используется такой признак, как спектральный центроид: чем выше полученное значение, тем ярче и острее звук, чем ниже, тем звук более глухой, басовый. Данный признак может быть вычислен с использованием функции *spectral_centroid()* [4].

Для получения информации о тембре музыкальной композиции можно использовать функцию *mfcc()*, которая также применяется в задачах определения жанра и распознавания музыкальных инструментов [4].

Процесс автоматизированного анализа и коррекции музыкального фона может быть представлен в виде последовательности этапов. На первом этапе осуществляется коррекция аудиофайла с использованием инструментов цифровой обработки сигналов. Второй этап включает извлечение и сохранение аудиодескрипторов. На основе полученных дескрипторов далее проводится автоматический анализ музыкальных композиций. Сравнение полученных значений с целевыми позволяет осуществлять подбор музыки в соответствии с видом общественного места и его атмосферой. Можно подбирать музыкальный фон под настроение посетителей, учитывая время суток, праздники и другое.

Для классификации музыкальных жанров применимы методы машинного обучения. К ним относятся метод опорных векторов (*SVM*), метод *k*-ближайших соседей (*k-NN*), дерево решений, случайный лес и нейронные сети [5].

Заключение. Эффективность акустического воздействия на посетителей напрямую зависит от параметров композиции, например, темпа, громкости, спектрального центроида. Извлечение дескрипторов из аудио, анализ и агрегация достижимы с использованием программного обеспечения, работающего с рассмотренными инструментами. Человеческий фактор исключается при классификации музыки, подбора плейлистов в соответствии с настроением посетителей, атмосферой общественного места и другими факторами, но при этом оставляя право за человеком на принятия решения. Применение методов цифровой обработки сигналов и анализа аудиодескрипторов позволяет формализовать процесс выбора музыкальных композиций. Это переводит формирование музыкального фона из области субъективного выбора в область инженерного анализа и алгоритмического управления.

Список литературы

1. Milliman, R.E. *Using Background Music to Affect the Behavior of Supermarket Shoppers* / R.E. Milliman // *Journal of Marketing*. – 1982. – Т. 46, № 3. – С. 86-91
2. North, A.C. *The Influence of In-Store Music on Wine Selections* / A.C. North, D.J. Hargreaves, J. McKendrick // *Journal of Applied Psychology*. – 1999. – Т. 84, № 2. – С. 271-276
3. *FFmpeg Filters Documentation* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ffmpeg.org/ffmpeg-filters.html>. – Дата доступа: 05.03.2026.
4. *librosa* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://librosa.org/doc/latest/index.html>. – Дата доступа: 06.03.2026.
5. *Analyzing the Performance of Machine Learning Models in Music Genre Classification* / L. Sharma [и др.] // *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. – 2023. – Т. 11, № 6. – С. 4196-4202

UDC 004.85:004.62

AUTOMATED ANALYSIS AND CORRECTION OF BACKGROUND MUSIC IN PUBLIC SPACES BASED ON PSYCHOACOUSTIC DESCRIPTORS AND DIGITAL SIGNAL PROCESSING TOOLS

Zinkovskaya E.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Levchenya Zh.B. – Cand. of Sci., Associate Professor of the department of ICSD

Annotation. The influence of background music in public spaces on visitors' behavior is argued based on the results of several experiments. The paper provides a description of tools for audio file processing and analysis used for automated playlist selection.

Keywords: background music, audio file, FFmpeg, Librosa, visitor behavior, digital signal processing, music analysis

МЕТОДЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ АГРЕГАЦИИ ГРУППОВЫХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МУЗЫКАЛЬНОГО ПЛЕЙЛИСТА С УЧЕТОМ КОНТЕКСТНЫХ ФАКТОРОВ

Зинковская Е.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Левченко Ж.Б. – к.т.н., доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Аргументируется необходимость сбора музыкальных предпочтений в общественных местах, их агрегация, динамическое обновление плейлиста. Описываются категории методов для работы с контекстной информацией и некоторые из методов агрегации групповых предпочтений.

Ключевые слова: рекомендации, агрегация, музыкальный фон, алгоритм, плейлист

Введение. В настоящее время музыкальный фон является неотъемлемой частью различных общественных мест. Он влияет на настроение, состояние посетителей, а значит и на их активность в отношении предоставляемых общественными местами услуг. Корректность подбора музыкального плейлиста критически важна для социального комфорта посетителей и их вовлеченности в процесс удовлетворения предоставляемыми услугами. Обеспечить это можно путем сбора предпочтений, их агрегации и динамического обновления плейлиста.

Основная часть. Посетители имеют различные музыкальные предпочтения, что требует динамической системы рекомендаций. Однако даже для одного человека предпочтения не являются статичными, поскольку они зависят от цикличности деятельности и психоэмоционального состояния. На них влияют время суток, дни недели, праздники и события (например, вечером в будний день человек более уставший, чем утром). Согласно концепции Л. Балтрунаса [1], учет временного контекста является критически важным при подборе музыкального контента. Поэтому перед агрегацией предпочтений необходимо выполнять фильтрацию по времени суток и дням недели. В условиях общественного места с высокой ротацией посетителей фильтрация и агрегация должны выполняться итерационно. Дополнительно могут применяться и другие фильтры, например по жанрам или тематике, задаваемые автоматически или администраторами заведения. Это позволяет сохранить атмосферу и адаптировать её под посетителей.

Существует 3 основных категории методов для работы с контекстной информацией [1]:

1 Двумерные методы. Выполняют фильтрацию в соответствии с контекстуальными методами либо до создания рекомендаций, либо после.

2 Методы контекстуального моделирования. Учитывают контекстную информацию непосредственно в процессе создания рекомендаций.

3 Гибридные методы. Комбинируют несколько подходов учета контекста.

Наиболее предпочтительно использование гибридных методов. Предварительная фильтрация формирует ограниченную базу треков, оптимизируя последующую агрегацию за счет меньшего количества производимых расчетов в сравнении с перебором всей базы треков. Это в свою очередь экономит ресурсы и оптимизирует процесс кэширования. Контекстное же моделирование позволяет сделать групповые рекомендации динамическими и более ориентированными на посетителей. Лучшее решение – объединение двух представленных подходов в гибридный метод.

Так как людей в общественном месте много, необходимо сбалансировать плейлист, чтобы он подходил «усредненному посетителю». Если один трек может не нравиться всем, то правильно подобранная очередь треков способна удовлетворить каждого или большинство.

Первый рассматриваемый метод – метод среднего значения. Он используется для формирования базового рейтинга, на основе которого строится очередь элементов, включаемых в плейлист. Расчет производится по формуле 1 [2].

$$score(G, i) = \frac{\sum_{u \in G} r^*(u, i)}{|G|}, \quad (1)$$

где $score(G, i)$ – прогноз рейтинга для объекта i к группе G ;

G – группа пользователей, предпочтения которых формируют плейлист;

i – оцениваемый объект (трек);

u – конкретный пользователь, входящий в группу G ;

$r^*(u, i)$ – предсказанный (реальный) рейтинг, который пользователь u поставил бы объекту i .

Метод позволяет рассчитать для каждого трека усредненную оценку предпочтений всей группы пользователей. На основе этих оценок формируется ранжированный список треков – от наиболее популярных композиций к наименее востребованным.

Второй метод называется «Балансировка без затухания». Формула 2 описывает функцию накопленной удовлетворенности пользователя [2].

$$sat(u, S) = \frac{\sum_{i \in S} r^*(u, i)}{\sum_{i \in M} r^*(u, i)}, \quad (2)$$

где $sat(u, S)$ – уровень накопленной удовлетворенности пользователя u последовательностью объектов (треков) S ;

i – конкретный объект (трек) в наборе;

u – конкретный пользователь из группы;

$r^*(u, i)$ – предсказанный (реальный) рейтинг, который пользователь u поставил бы объекту i ;

S – последовательность треков, которая уже сформирована к текущему моменту;

M – гипотетический набор треков (той же длины, что и S), имеющий самые высокие индивидуальные рейтинги для пользователя u во всей коллекции.

Метод балансировки без затухания базируется на расчете функции накопленной удовлетворенности, которая представляет собой отношение суммарного рейтинга проигрываемых треков к максимально возможному рейтингу конкретного пользователя. Использование данного метода обеспечивает высокую вероятность удовлетворения музыкальных предпочтений каждого посетителя. Выбор следующего трека осуществляется по принципу максимизации минимальной удовлетворенности среди всех пользователей в группе.

Третий метод – балансировка с затуханием. В этом методе наибольший вес присваивается треку, который звучит в данный момент, а веса всех остальных композиций убывают в геометрической прогрессии. Расчет производится по формуле 3.

$$sat(u, S) = \frac{\sum_{k=1}^{|S|} \gamma^{|S|-k} r^*(u, i_k)}{\sum_{l=1}^{|M|} \gamma^{|M|-k} r^*(u, i_l)}, \quad (3)$$

где $sat(u, S)$ – уровень накопленной удовлетворенности пользователя u последовательностью объектов (треков) S с учетом забывания старых треков;

γ – коэффициент затухания;

k (или i) – порядковый номер трека в очереди;

i – конкретный объект (трек) в наборе;

u – конкретный пользователь из группы;

$r^*(u, i)$ – предсказанный (реальный) рейтинг, который пользователь u поставил бы объекту i ;

S – последовательность треков, которая уже сформирована к текущему моменту;

M – гипотетический набор треков (той же длины, что и S), имеющий самые высокие индивидуальные рейтинги для пользователя u во всей коллекции.

Преимущество данного подхода – актуальность формируемого плейлиста, достигаемая за счет «забывания» ранее проигранных треков. Это обеспечивается параметром затухания, благодаря которому более новые композиции получают больший вес при расчете удовлетворенности посетителя.

Предложенные методы агрегации обладают линейной вычислительной сложностью, что позволяет применять их в условиях многотысячной аудитории с учетом предварительной фильтрации отправляемых предпочтений.

Для создания более точной последовательности треков более предпочтительным является 3 вариант.

Для формирования наиболее релевантного индивидуального рейтинга, применяемого в балансировке с затуханием, можно использовать статистический анализ частоты прослушивания, представленный в формуле 4.

$$freq_{i,j} = \frac{count(i,j)}{totalCount}, \quad (4)$$

где i – конкретный пользователь;

j – конкретный трек;

$freq_{i,j}$ – нормализованная частота прослушивания трека j пользователем i ;

$count(i, j)$ – количество прослушивания трека j пользователем i ;

$totalCount$ – общее количество прослушиваний всех треков пользователем i за рассматриваемый период.

Заключение. Правильно выбранный музыкальный фон играет значимую роль для бизнеса в сфере офлайн-услуг и розничной торговли. Исследуемые методы позволяют в динамическом режиме составлять плейлисты на основе предпочтений группы. В рассматриваемом контексте наилучшие результаты для обработки контекстной информации демонстрирует гибридный подход, тогда как для агрегации данных наиболее эффективна «Балансировка с затуханием».

Список литературы

1. Valera, A. Context-Aware Music Recommender Systems for Groups: A Comparative Study / A. Valera, A. Lozano Murciego, M.N. Moreno-García // *Information*. – 2021. – Т. 12, № 12. – С. 1-16
2. Piliponyte, A. Sequential Music Recommendations for Groups by Balancing User Satisfaction / A. Piliponyte, F. Ricci, J. Koschwitz // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2013. – № 997. – С. 6-11

UDC 004.85:004.62

METHODS OF DYNAMIC AGGREGATION OF GROUP PREFERENCES IN MUSIC PLAYLIST GENERATION WITH CONSIDERATION OF CONTEXTUAL FACTORS

Zinkovskaya E.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Levchenya Zh.B. – Cand. of Sci., Associate Professor of the department of ICSD

Annotation. The necessity of collecting musical preferences in public spaces, their aggregation, and dynamic playlist updating are justified. Categories of methods for handling contextual information and some methods of group preference aggregation are described.

Keywords: recommendation, aggregation, background music, algorithm, playlist

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ *PWM* И *MPPT* В КОНТРОЛЛЕРАХ ЗАРЯДА СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Куделич К.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Ларькин А. Д. – магистр, ассистент кафедры ПИКС

Аннотация. Рассмотрены две основные технологии контроллеров заряда для солнечных батарей – *PWM* (шиотно-импульсная модуляция) и *MPPT* (отслеживание точки максимальной мощности). Проанализированы принципы их работы, преимущества, недостатки и ключевые отличия. Проведено сравнение эффективности в различных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, *PWM*, отслеживание точки максимальной мощности, *MPPT*, контроллер заряда солнечной батареи.

Введение. Эффективность автономных солнечных систем во многом определяется правильным выбором контроллера заряда – устройства, которое управляет процессом зарядки аккумулятора и обеспечивает максимальное использование энергии, вырабатываемой фотоэлектрическими панелями. На сегодняшний день наиболее распространены два типа контроллеров: на основе широтно-импульсной модуляции (*PWM*) и с функцией отслеживания точки максимальной мощности (*MPPT*).

Основная часть. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ/*PWM*) – это метод управления мощностью, подаваемой на нагрузку, путем изменения длительности (ширины) импульсов при постоянной частоте и амплитуде сигнала. Он основан на переключении источника питания между состояниями «включено» и «выключено», что обеспечивает высокий КПД и минимальный нагрев управляющих элементов

Нагрузка получает питание не постоянно, а импульсами. Среднее напряжение или ток регулируется изменением времени включенного состояния (импульса) внутри фиксированного периода. Чем больше длительность включенного состояния, тем выше среднее значение напряжения или мощности, передаваемой на нагрузку. [1]

PWM -контроллер работает путем переключения между различными уровнями электрического тока в зависимости от того, какой тип выхода требуется от системы, которую он питает – постоянный ток (*DC*) или переменный ток (*AC*).

Контроллер регулирует это переключение с помощью широтно-импульсной модуляции, которая посылает регулярные импульсы через определенные промежутки времени с различными рабочими циклами (процентное время «включения»). [2]

MPPT (*Maximum Power Point Tracking* – отслеживание точки максимальной мощности) – это специальная технология, которая применяется для повышения выходной мощности турбин и фотоэлектрических солнечных модулей в различных обстоятельствах. Он динамически подбирает оптимальное соотношение, обеспечивая отбор максимально возможной мощности (*MPP*) при меняющейся освещенности и температуре. Контроллер *MPPT* может в режиме реального времени определять напряжение, генерируемое солнечными панелями, и отслеживать максимальные значения напряжения и тока, чтобы система могла заряжать аккумулятор с максимальной выходной мощностью. *MPPT* может применяться в фотоэлектрических инверторах для координации с солнечными панелями, батареями и рабочими нагрузками. [3]

Таким образом, принципиальное отличие заключается в том, что *PWM*-контроллер лишь ограничивает ток на уровне, соответствующем напряжению аккумулятора, тогда как *MPPT*-контроллер преобразует избыточное напряжение панели в дополнительный зарядный ток, что и обеспечивает прирост вырабатываемой энергии.

Для визуального представления описанных выше принципов работы на рисунке 1 приведён график прямоугольных импульсов с изменяющейся шириной импульса, что отражает суть широтно-импульсной модуляции. На рисунке 2 показан график мощности, генерируемой 12-вольтовым *MPPT*-контроллером при 100% освещённости, который иллюстрирует способность контроллера удерживать рабочую точку в области максимальной мощности.



Рисунок 1 – График прямоугольных импульсов с меняющейся шириной импульса, где T – период ШИМ, t – длительность импульса

Рисунок 2 – График мощности 12-и вольтовой *MPPT* контроллера солнечной панели, при 100% освещённости

MPPT контроллеры заряда отличаются своей способностью максимизировать мощность, извлекаемую из солнечных панелей, в широком спектре условий освещенности. Они автоматически адаптируются к изменениям интенсивности солнечного света, что позволяет поддерживать оптимальную производительность даже в облачную погоду или при слабом солнечном свете. В условиях, когда освещенность меняется в течение дня (например, в рассветные или закатные часы), *MPPT* контроллеры способны определять и поддерживать точку максимальной мощности, обеспечивая таким образом более эффективное использование солнечных панелей. [4]

PWM-контроллеры просты и надёжны, но ограничены в эффективности при переменной освещённости. *MPPT*-контроллеры извлекают на 20–30% больше энергии и позволяют последовательно соединять панели, но имеют более высокую стоимость. *MPPT* обеспечивает температурную компенсацию заряда аккумулятора, допускает использование более длинных кабелей за счёт повышенного входного напряжения, эффективнее работает при частичном затенении панелей и лучше подходит для масштабируемых систем. Выбор зависит от требуемой эффективности и бюджета.

Из приведённых определений выявляется ещё одно существенное различие, касающееся характера взаимодействия контроллера с источником энергии. *PWM*-контроллер реализует дискретное управление путём переключения источника питания между состояниями «включено» и «выключено», что по своей сути представляет собой метод регулирования уже существующего уровня мощности без поиска оптимальной рабочей точки. В отличие от него, *MPPT*-контроллер выполняет непрерывное измерение текущих значений напряжения и тока солнечных панелей в реальном времени, что позволяет ему не просто коммутировать сигнал, а активно отслеживать и динамически подбирать оптимальное соотношение между напряжением и током для достижения максимально возможной мощности (MPP). Таким образом, если *PWM* ориентирован на стабильное поддержание заданного режима заряда путём

изменения длительности импульсов, то МРРТ решает более сложную задачу – адаптацию к изменяющимся внешним условиям (освещённости и температуре) с целью извлечения максимума энергии из фотоэлектрического модуля в каждый момент времени.

Главным фактором при выборе контроллера считается будущее назначение с необходимой степенью производительности. С простыми легкими задачами и небольшой солнечной системой справится *PWM*. Если требуется максимальная выработка, то предпочтение стоит отдать *MPPT*. При этом вне зависимости от выбранной технологии решающее значение имеет качество изготовления устройства, которое напрямую зависит от надёжности проверенного производителя.

Закключение. В ходе работы были рассмотрены две основные технологии контроллеров заряда солнечных батарей – *PWM* (широотно-импульсная модуляция) и *MPPT* (отслеживание точки максимальной мощности). Проведённый анализ позволяет сделать вывод, что каждая из технологий имеет свою область применения, и выбор оптимального решения напрямую зависит от конкретных условий эксплуатации, бюджета проекта и требований к эффективности системы. Таким образом, при проектировании солнечной системы необходимо исходить из баланса между начальными затратами и долгосрочной энергетической эффективностью, отдавая предпочтение проверенным производителям вне зависимости от выбранного типа контроллера. Следовательно, для систем с высокой энергетической нагрузкой, ограниченной площадью размещения панелей или нестабильными погодными условиями применение *MPPT* является экономически оправданным, тогда как *PWM* остаётся рациональным выбором для маломощных и бюджетных установок.

Список литературы

1. Что такое ШИМ? – 2026 [Электронный ресурс]. – [https://digitalweed.ru/ что-такое-шим-pwm/] – Дата доступа: 30.03.2026.
2. Как широтно-импульсная модуляция используется в автоматизации? – 2026 [Электронный ресурс]. – [https://unitmc.ru/news/chto-takoe-shim-kak-shirotno-impulsnaya-m/] – Дата доступа: 30.03.2026.
3. Что такое МРРТ? – 2026 [Электронный ресурс]. – [https://ru.veichi.com/knowledge/what-is-mppt.html] – Дата доступа: 30.03.2026.
4. Сравнение МРРТ с PWM контроллеров заряда – 2026 [Электронный ресурс]. – [https://e-solarpower.ru/stati/mppt-protiv-pwm-kontrollerov-zaryada/?srsltid=AfmBOoqOgOIlJlxJVHhOEaWD0ojsvUYjtPdVkipgO7HrQwzTXb65gewD] – Дата доступа: 30.03.2026.
5. Что такое контроллер заряда солнечной батареи? – 2026 [Электронный ресурс]. – [https://solartime.by/novosti/kakoj-kontroller-zaryada-solnechnoj-batarei-vybrat-pwm-ili-mppt.html] – Дата доступа: 30.03.2026.

UDC 676.7

APPLICATION OF PWM AND MPPT TECHNOLOGIES IN SOLAR BATTERY CHARGE CONTROLLERS

Kudelich K.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Larkin A.D. – Master's degree, Assistant of the department of ICSD

Annotation. Two main technologies for solar battery charge controllers – PWM (Pulse-Width Modulation) and MPPT (Maximum Power Point Tracking) – are examined. Their operating principles, advantages, disadvantages, and key differences are analyzed. A comparison of their efficiency under various operating conditions is performed.

Keywords: pulse-width modulation, PWM, maximum power point tracking, MPPT, solar battery charge controller.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОФИЛЯХ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Бавбель Е.И.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Алексеев В.Ф. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Рассматриваются закономерности течения воздуха при малых числах Рейнольдса. Описаны особенности формирования пограничного слоя и условия возникновения отрыва потока на аэродинамических профилях. Показано влияние числа Рейнольдса на аэродинамические характеристики летательных аппаратов малого размера.

Ключевые слова: число Рейнольдса, аэродинамика, пограничный слой, ламинарное течение, аэродинамический профиль.

Исследование вязких течений около аэродинамических поверхностей представляет фундаментальную проблему современной аэродинамики, решение которой определяет эффективность проектирования летательных аппаратов различных классов [1-19]. Характер течения воздуха вокруг летательного аппарата определяется рядом параметров, среди которых особое значение имеет число Рейнольдса. Данный параметр характеризует соотношение инерционных и вязкостных сил в потоке воздуха и позволяет определить режим течения [5].

Для летательных аппаратов малого размера (мини- и микро-БПЛА, авиамодели) типичны значения числа Рейнольдса порядка 10^4 – 10^5 , что на два–три порядка ниже, чем для транспортных самолётов [3]. В указанном диапазоне вязкостные эффекты приобретают первостепенное значение, обуславливая специфику структуры пограничного слоя и механизмов взаимодействия потока с обтекаемой поверхностью [4].

Формирование пограничного слоя на профиле крыла при малых числах Рейнольдса характеризуется преобладанием ламинарного режима течения, толщина которого определяется соотношением $\delta \approx 5x/\sqrt{Re_x}$, где x – текущая координата вдоль профиля, Re_x – локальное число Рейнольдса [5]. Ламинарный пограничный слой обладает повышенной чувствительностью к нарушению благоприятного градиента давления, что предопределяет возможность преждевременного отрыва потока и формирования зоны рециркуляции с соответствующим изменением аэродинамических сил и моментов [6].

Отрыв ламинарного пограничного слоя приводит к качественной перестройке структуры обтекания, сопровождающейся ростом сопротивления давления и снижением несущей способности профиля [7]. Данные эффекты детерминируют необходимость разработки специализированных методов профилирования и управления пограничным слоем для обеспечения требуемых аэродинамических характеристик летательных аппаратов малого размера [8].

Актуальность исследования обусловлена расширением областей применения беспилотных авиационных систем с ограниченными линейными размерами, требующих достоверного прогнозирования аэродинамических характеристик в условиях доминирования вязкостных эффектов [9]. Существующие методики расчёта, верифицированные для высоких чисел Рейнольдса, требуют адаптации и валидации для диапазона $Re < 10^5$ с учётом специфики ламинарно-турбулентного перехода и отрывных явлений [10].

Целью настоящей работы является анализ закономерностей формирования пограничного слоя на аэродинамических профилях при малых числах Рейнольдса и оценка влияния вязкостных эффектов на интегральные аэродинамические характеристики летательных аппаратов малого размера.

Для летательных аппаратов малого размера характерны относительно небольшие линейные размеры и сравнительно низкие скорости полета. В результате этого значения числа Рейнольдса оказываются значительно ниже, чем для крупных летательных аппаратов. В таких условиях вязкостные силы начинают оказывать более заметное влияние на структуру потока и на характер взаимодействия воздушного потока с поверхностью крыла.

Число Рейнольдса определяется следующим выражением:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (1)$$

где: ρ – плотность воздуха;

V – скорость потока;

L – характерный линейный размер;

μ – динамическая вязкость воздуха.

Для летательных аппаратов малого размера значения числа Рейнольдса обычно находятся в диапазоне 10^4 – 10^5 . В данном диапазоне течение воздуха имеет ряд особенностей, связанных с повышенным влиянием вязкости. Это приводит к изменению структуры пограничного слоя и может оказывать заметное влияние на аэродинамические характеристики профилей крыла [16].

При движении воздушного потока вдоль поверхности аэродинамического профиля формируется пограничный слой. Пограничный слой представляет собой тонкую область потока, в которой скорость воздуха изменяется от нуля на поверхности крыла до скорости основного потока. Формирование пограничного слоя связано с действием вязкости воздуха и взаимодействием потока с поверхностью аэродинамического профиля.

Толщина пограничного слоя зависит от расстояния от передней кромки крыла и параметров потока. Для ламинарного режима течения она может быть приближенно определена по выражению:

$$\delta \approx \frac{5x}{\sqrt{Re_x}} \quad (2)$$

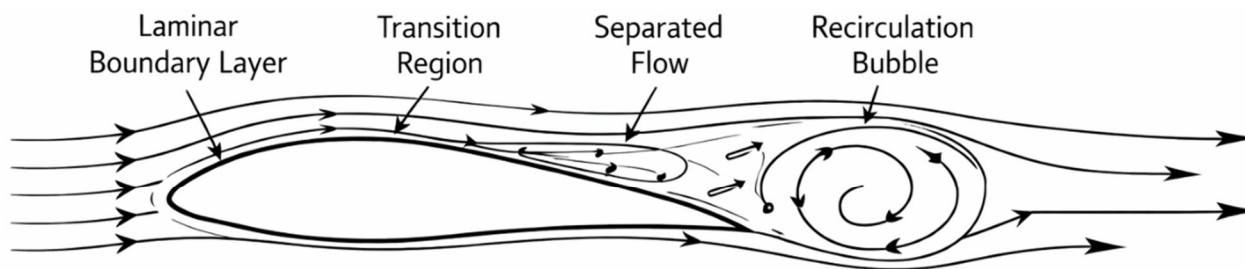
где: x – расстояние от передней кромки профиля;

Re_x – локальное число Рейнольдса.

При малых числах Рейнольдса пограничный слой может сохранять ламинарный характер на значительной части поверхности крыла. Однако ламинарное течение обладает меньшей устойчивостью по сравнению с турбулентным. Под действием внешних возмущений ламинарный пограничный слой может переходить в турбулентный режим течения.

Кроме того, при неблагоприятном градиенте давления возможно возникновение отрыва потока от поверхности аэродинамического профиля. Отрыв потока сопровождается образованием вихревых структур и приводит к изменению распределения давления на поверхности крыла. Это может вызывать увеличение аэродинамического сопротивления и снижение подъемной силы профиля [17].

На рисунке 1 представлена схема формирования пограничного слоя при малых числах Рейнольдса.



Airfoil at Low Reynolds Number

Рисунок 1 – Формирование пограничного слоя и возможный отрыв потока при малых числах Рейнольдса

Отрыв потока является одним из факторов, оказывающих существенное влияние на аэродинамические характеристики летательных аппаратов малого размера. В связи с этим при проектировании аэродинамических профилей необходимо учитывать влияние числа Рейнольдса на структуру потока и характеристики пограничного слоя.

Анализ закономерностей течения воздуха при малых числах Рейнольдса позволяет более точно оценивать аэродинамические характеристики летательных аппаратов малого размера. Учет данных особенностей является важным этапом при проектировании аэродинамических профилей и оптимизации параметров летательных аппаратов [1–19].

В работе рассмотрены закономерности течения воздуха при малых числах Рейнольдса и их влияние на аэродинамические характеристики летательных аппаратов малого размера. Показано, что при уменьшении числа Рейнольдса возрастает влияние вязкостных сил, что приводит к изменению структуры пограничного слоя и характера взаимодействия воздушного потока с поверхностью аэродинамического профиля.

Отмечено, что при малых числах Рейнольдса пограничный слой может сохранять ламинарный характер на значительной части поверхности крыла, однако такой режим течения обладает меньшей устойчивостью. При неблагоприятных условиях возможен переход ламинарного течения в турбулентное, а также возникновение отрыва потока, что приводит к увеличению аэродинамического сопротивления и снижению подъемной силы.

Полученные результаты показывают, что учет закономерностей течения воздуха при малых числах Рейнольдса является важным этапом при проектировании летательных аппаратов малого размера. Анализ структуры пограничного слоя и условий возникновения отрыва потока позволяет более точно оценивать аэродинамические характеристики профилей и повышать эффективность летательных аппаратов.

Дополнительное исследование особенностей течения воздуха при малых числах Рейнольдса представляет интерес для дальнейшего совершенствования аэродинамических профилей и разработки новых конструктивных решений в области летательных аппаратов малого размера. Учет данных факторов позволяет улучшить аэродинамическое качество и повысить эффективность эксплуатации летательных аппаратов.

Список литературы

1. Schlichting H., Gersten K. *Boundary-Layer Theory*. – 8th ed. – Berlin: Springer, 2017. – 805 p. – ISBN 978-3-662-52919-5.
2. White F.M. *Viscous Fluid Flow*. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2006. – 629 p. – ISBN 978-0-07-124493-0.
3. Mueller T.J., DeLaurier J.D. *Aerodynamics of small vehicles* // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2003. – Vol. 35. – P. 89–111. – DOI: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161102.
4. Lissaman P.B.S. *Low-Reynolds-number airfoils* // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 1983. – Vol. 15. – P. 223–239. – DOI: 10.1146/annurev.fl.15.010183.001255.
5. Rosenhead L. *Laminar Boundary Layers*. – Oxford: Clarendon Press, 1963. – 687 p.
6. Tani I. *Boundary-layer transition* // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 1969. – Vol. 1. – P. 169–196. – DOI: 10.1146/annurev.fl.01.010169.001125.
7. Gad-el-Hak M. *Flow control: Passive, active, and reactive flow management*. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 422 p. – ISBN 978-0-521-77006-1.
8. Петров Г.И. *Аэродинамика тел малых размеров*. – М.: Наука, 1983. – 256 с.

9. Sirohi J. *Micro air vehicles* // *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. – Chichester: John Wiley & Sons, 2010. – DOI: 10.1002/9780470686652.eae238.
10. Rumsey C.L., Slotnick J.P. *Overview and summary of the Second AIAA High Lift Prediction Workshop* // *Journal of Aircraft*. – 2015. – Vol. 52, № 4. – P. 1006–1025. – DOI: 10.2514/1.C032661.
11. Бавбель, Е. И. Современные материалы для создания легких и устойчивых БПЛА / Е. И. Бавбель // *Научные исследования 2024* : сборник статей XIII Международной научно-практической конференции / МЦНС «Наука и просвещение». – Пенза, 2024. – С. 36–39.
12. Бавбель, Е. И. Анализ аэродинамических характеристик крыла беспилотного летательного аппарата / Е. И. Бавбель // *Глобальные вызовы и научные решения : сборник статей и тезисов Международной научно-практической конференции (12 марта 2026 г., г. Иркутск) / Омега сайнс. – Уфа, 2026. – С. 26–30.*
13. Бавбель, Е. И. Основные факторы, влияющие на эффективность беспилотных летательных аппаратов / Е. И. Бавбель // *Глобальные вызовы и научные решения : сборник статей и тезисов Международной научно-практической конференции (12 марта 2026 г., г. Иркутск) / Омега сайнс. – Уфа, 2026. – С. 31–35.*
14. Бавбель, Е. И. Подходы к проектированию БПЛА с повышенной выносливостью и грузоподъемностью / Е. И. Бавбель, А. А. Бородин, Е. В. Коляда // *Новые информационные технологии в научных исследованиях «НИИТ-2023» : материалы XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 22–24 ноября, 2023 г. : в 2 т. Т 2 / Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина. – Рязань, 2023. – С. 60–62.*
15. White F. *Fluid Mechanics* / F. White. – New York : McGraw-Hill Education, 2016. – 864 p.
16. Schlichting H. *Boundary-Layer Theory* / H. Schlichting, K. Gersten. – Berlin : Springer, 2017. – 805 p.
17. Pope S. *Turbulent Flows* / S. Pope. – Cambridge : Cambridge University Press, 2000. – 771 p.
18. McCormick B. *Aerodynamics, Aeronautics and Flight Mechanics* / B. McCormick. – New York : John Wiley & Sons, 1995. – 652 p.
19. Houghton E. *Aerodynamics for Engineering Students* / E. Houghton, P. Carpenter. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. – 688 p.

UDC 629.7

PATTERNS OF AIRFLOW AT LOW REYNOLDS NUMBERS

Bavbel E.I.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Viktor F. Alexeev – Cand. of Sci., assistant professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. The paper considers the patterns of airflow at low Reynolds numbers. The features of boundary layer formation and the conditions of flow separation on aerodynamic profiles are described. The influence of the Reynolds number on aerodynamic characteristics of small aircraft is analyzed.

Keywords: Reynolds number, aerodynamics, boundary layer, laminar flow, aerodynamic profile.

БАРОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Бавбель Е.И.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Алексеев В. Ф. – к. т. н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Рассматриваются барометрические методы определения высоты полета беспилотных летательных аппаратов. Описаны принципы работы барометрических датчиков давления и их применение в системах навигации летательных аппаратов. Показано влияние атмосферного давления на определение высоты полета.

Ключевые слова: барометрический датчик, атмосферное давление, высота полета, беспилотный летательный аппарат, навигационные системы.

Определение высоты полета является одной из важнейших задач навигации летательных аппаратов. Данные о высоте используются системами управления для поддержания заданного режима полета, стабилизации аппарата и обеспечения безопасности выполнения полетного задания. В современных беспилотных летательных аппаратах применяются различные методы измерения высоты, среди которых широко используются барометрические методы [1].

Барометрические методы основаны на измерении атмосферного давления и использовании зависимости между давлением и высотой. Атмосферное давление уменьшается с увеличением высоты, поэтому измеряя текущее значение давления можно определить высоту летательного аппарата относительно некоторого опорного уровня. Такой подход применяется в авиации на протяжении длительного времени и используется как в пилотируемых, так и в беспилотных летательных аппаратах [2].

Числовая зависимость между атмосферным давлением и высотой описывается барометрической формулой:

$$h = \frac{RT}{gM} \ln \left(\frac{p_0}{p} \right), \quad (1)$$

где: h – высота полета;

R – универсальная газовая постоянная;

T – температура воздуха;

g – ускорение свободного падения;

M – молярная масса воздуха;

p_0 – давление на уровне отсчета – измеренное атмосферное давление.

Данная зависимость используется в системах измерения высоты для вычисления текущего положения летательного аппарата. Барометрический датчик измеряет атмосферное давление, после чего на основе полученных данных вычисляется высота полета.

Современные барометрические датчики представляют собой компактные электронные устройства, основанные на использовании чувствительных элементов, реагирующих на изменение давления. В большинстве случаев используются микромеханические датчики давления, изготовленные по технологии MEMS. Такие датчики обладают высокой чувствительностью, небольшими размерами и низким энергопотреблением, что делает их удобными для применения в бортовых системах летательных аппаратов [3-4].

Одним из преимуществ барометрических методов определения высоты является простота реализации. Для работы барометрического датчика не требуется использование внешних источников сигнала, таких как спутниковые навигационные системы. Это позволяет

применять данный метод в различных условиях эксплуатации, включая ситуации, когда сигналы спутниковой навигации могут быть недоступны или искажены.

Барометрические датчики часто используются совместно с другими навигационными приборами. Например, данные барометрического датчика могут комбинироваться с информацией от инерциальных измерительных систем, GPS-приемников и других датчиков. Совместная обработка данных позволяет повысить точность определения высоты и уменьшить влияние внешних факторов на результаты измерений.

На рисунке 1 представлена схема принципа работы барометрического датчика давления, применяемого в системах определения высоты полета.

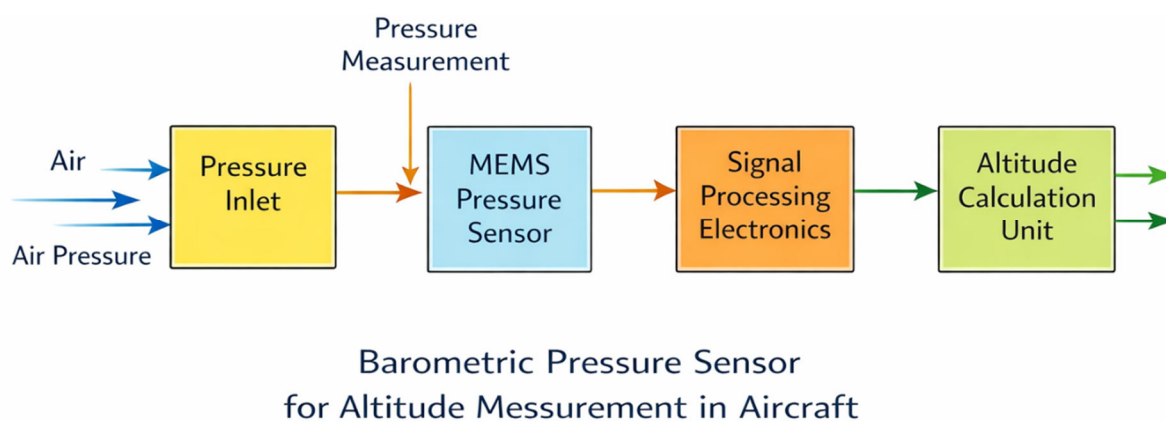


Рисунок 1 – Принцип работы барометрического датчика давления

Несмотря на широкое применение, барометрические методы имеют определенные ограничения. Основной источник погрешностей связан с изменением атмосферного давления в результате погодных условий. Давление воздуха может изменяться из-за изменения температуры, влажности и движения воздушных масс. В результате этого измеренная высота может отличаться от фактической.

Для уменьшения влияния данных факторов применяются методы коррекции и фильтрации измерений. Например, используется предварительная калибровка датчиков, а также алгоритмы обработки данных, позволяющие компенсировать влияние атмосферных изменений. Кроме того, в некоторых системах используется комбинирование данных нескольких датчиков, что позволяет повысить надежность измерений [5].

Барометрические методы занимают важное место среди средств определения высоты полета летательных аппаратов. Простота конструкции датчиков, их компактность и возможность интеграции с другими навигационными системами обеспечивают широкое применение данного способа в современных бортовых системах. В работе рассмотрены барометрические методы определения высоты полета летательных аппаратов и особенности их применения в навигационных системах. Показано, что использование барометрических датчиков позволяет получать информацию о высоте на основе измерения атмосферного давления и его зависимости от высоты.

Отмечено, что современные барометрические датчики обладают высокой чувствительностью и небольшими габаритами, что позволяет эффективно использовать их в бортовых системах летательных аппаратов. Совместное применение барометрических датчиков с другими навигационными приборами позволяет повысить точность определения высоты и устойчивость работы навигационных систем.

Использование барометрических методов измерения высоты остается одним из распространенных решений в авиационных системах навигации. Дальнейшее совершенствование датчиков давления и алгоритмов обработки измерительной информации позволит повысить точность определения высоты и расширить возможности применения данных систем в летательных аппаратах.

Список литературы

1. R. *Flight Stability and Automatic Control*. – New York : McGraw-Hill, 1998.
2. Stevens, B., Lewis, F. *Aircraft Control and Simulation*. – Hoboken : Wiley, 2015.
3. Cook, M. *Flight Dynamics Principles*. – Oxford : Butterworth-Heinemann, 2012.
4. Sadraey, M. *Aircraft Design: A Systems Engineering Approach*. – Oxford : Wiley, 2013.
5. Etkin, B., Reid, L. *Dynamics of Flight: Stability and Control*. – New York : Wiley, 1996

UDC 629.7

**BAROMETRIC METHODS FOR DETERMINING THE FLIGHT ALTITUDE
OF UNMANNED AERIAL VEHICLES**

Bavbel E.I.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Viktor F. Alexeev – Cand. of Sci., assistant professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. The paper considers barometric methods for determining the flight altitude of unmanned aerial vehicles. The operating principles of barometric pressure sensors and their application in navigation systems are described. The influence of atmospheric pressure on altitude determination is analyzed.

Keywords: barometric sensor, atmospheric pressure, flight altitude, unmanned aerial vehicle, navigation systems.

МОДЕЛИРОВАНИЯ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ МНОГОКАНАЛЬНОГО КОНТРОЛЛЕРА УПРАВЛЕНИЯ СЕРВОМОТОРАМИ

Быстров М.Ю.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Алексеев В.Ф. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. В работе рассмотрен процесс определения собственных частот колебаний печатной платы электронного контроллера управления сервомоторами. Анализ выполнялся с использованием двух программных средств – *SolidWorks* и *COMSOL*. В ходе моделирования была построена трёхмерная модель платы с установленными компонентами, заданы материалы и граничные условия, после чего выполнен частотный анализ. В результате установлено, что собственная частота конструкции составляет 1219,5 Гц в *SolidWorks* и 1106,6 Гц в *COMSOL*. Проведено сравнение результатов и дана оценка различий. Показано, что несмотря на расхождения, обе программы дают схожую картину поведения конструкции.

Ключевые слова: печатная плата, собственная частота, частотный анализ, вибрации, моделирование, *SolidWorks*, *COMSOL*.

Введение. При разработке электронных устройств важно учитывать не только электрические характеристики, но и механические свойства конструкции. Печатные платы являются основой большинства электронных систем, и именно они принимают на себя воздействие вибраций, ударов и других нагрузок [1–8].

Во время работы устройства или при транспортировке могут возникать механические колебания. Если частота этих колебаний совпадает с собственной частотой платы, возникает резонанс. Это может привести к повреждению дорожек, пайки или компонентов.

Чтобы избежать подобных ситуаций, на этапе проектирования выполняется анализ собственных частот. Такой анализ позволяет заранее определить, при каких условиях конструкция может работать нестабильно.

В настоящее время для решения подобных задач широко применяются системы автоматизированного проектирования и инженерного анализа. Среди них можно выделить *SolidWorks* и *COMSOL*.

Целью данной работы является определение собственных частот печатной платы контроллера и сравнение результатов, полученных в разных программных средах.

Роль многоканальных контроллеров в современных мехатронных системах. Многоканальные контроллеры управления сервомоторами являются ключевым звеном в структуре современных мехатронных систем, включая промышленные роботы, станки с числовым программным управлением (ЧПУ), автоматизированные линии сборки, медицинскую технику и высокоточное позиционирующее оборудование. Эти устройства осуществляют синхронное управление несколькими исполнительными механизмами, обеспечивая координацию движений с высокой точностью и быстродействием.

В условиях развития промышленности 4.0 и роботизации производства требования к надежности и безотказности контроллеров управления существенно возрастают. Отказ такого устройства в процессе эксплуатации может привести к нарушению технологического цикла, повреждению дорогостоящего оборудования, а в некоторых случаях – к созданию аварийных ситуаций, угрожающих безопасности персонала.

Влияние механических воздействий на работоспособность печатных плат. Печатная плата контроллера, являющаяся несущей конструкцией для всех электронных компонентов, в процессе эксплуатации подвергается комплексным механическим воздействиям. Особую значимость эта проблема приобретает для многоканальных

контроллеров, которые, как правило, имеют увеличенные габариты печатной платы (для размещения нескольких каналов управления) и, соответственно, меньшую жесткость конструкции. При этом на плате могут быть установлены тяжелые компоненты (силовые модули, трансформаторы, конденсаторы большой емкости), создающие дополнительные сосредоточенные массы, что снижает собственные частоты колебаний.

Последствия недостаточной вибропрочности. Недостаточная вибропрочность печатной платы может привести к следующим негативным последствиям: механическому разрушению паяных соединений (особенно для компонентов в корпусах BGA, QFN), что является одной из наиболее частых причин отказов электроники в вибрационных условиях; повреждению выводов компонентов и дорожек печатного монтажа; нарушению электрических контактов в разъемных соединениях; микротрещинам в диэлектрике печатной платы, приводящим к снижению сопротивления изоляции и пробоям; изменению параметров электронных компонентов под воздействием механических напряжений (особенно для кварцевых резонаторов, конденсаторов, индуктивных элементов).

Ограничения традиционных подходов к оценке динамической прочности. Традиционные методы обеспечения вибропрочности печатных плат базируются на: аналитических расчетах, использующих упрощенные модели (пластина постоянной толщины с равномерным распределением массы), которые не учитывают реальную топологию размещения компонентов и локальные изменения жесткости; натурных испытаниях на вибростендах, требующих изготовления полноценных опытных образцов, что сопряжено со значительными временными и материальными затратами, а также не позволяет оперативно оценить влияние конструктивных изменений на динамические характеристики; эмпирических рекомендациях, основанных на опыте проектирования аналогичных устройств, которые не всегда применимы к новым конструктивным решениям [1–8].

Выявление проблем вибропрочности на этапе испытаний готового изделия приводит к необходимости дорогостоящих доработок (изменение геометрии платы, введение дополнительных креплений, применение демпфирующих материалов) и затягиванию сроков вывода продукции на рынок.

Возможности и проблемы компьютерного моделирования. Современные системы автоматизированного инженерного анализа (CAE) позволяют перенести оценку динамических характеристик печатных плат на ранние этапы проектирования. Модальный анализ, реализуемый в таких программных комплексах, как ANSYS, SOLIDWORKS Simulation, COMSOL Multiphysics, дает возможность определить собственные частоты и формы колебаний конструкции, выявить зоны наибольших деформаций и оценить запасы по резонансным частотам.

Эффективность компьютерного моделирования определяется рядом факторов: достоверностью исходных данных о физико-механических свойствах материалов (стеклотекстолит FR-4, медь, припой, корпуса компонентов); адекватностью выбора расчетных схем и граничных условий (способы крепления платы, наличие демпфирующих элементов); качеством конечно-элементной сетки, особенно в зонах концентрации напряжений; учетом влияния установленных компонентов на общую жесткость и распределение масс.

В открытых источниках недостаточно представлены систематические исследования по моделированию собственных частот колебаний печатных плат многоканальных контроллеров управления сервомоторами, учитывающие реальную конструктивную сложность таких устройств. Отсутствуют количественные оценки влияния различных факторов (способ крепления, наличие тяжелых компонентов, конструкция корпуса) на динамические характеристики платы.

Основная часть. Для проведения анализа была использована трёхмерная модель печатной платы контроллера с размещёнными на ней электронными компонентами. Модель включает саму плату, разъёмы, микроконтроллер и другие элементы, влияющие на массу и жесткость конструкции. На первом этапе моделирование выполнялось в программе

SolidWorks. Для этого была создана геометрическая модель платы с учетом всех основных элементов. Далее был подключен модуль *Simulation*, который позволяет выполнять инженерные расчёты [2, 6].

В качестве типа исследования был выбран частотный анализ. Такой тип анализа используется для определения собственных частот и форм колебаний конструкции. Особое внимание было уделено заданию материалов. Для печатной платы был выбран материал, соответствующий стеклотекстолиту, а для компонентов – материалы с учетом их свойств. Это важно, так как масса и жесткость напрямую влияют на результат. Граничные условия задавались в виде закрепления платы в местах крепежных отверстий. Такой подход позволяет приблизить модель к реальным условиям эксплуатации. После этого была построена конечно-элементная сетка. Чем качественнее сетка, тем точнее результат, однако увеличивается время расчета. После завершения настройки был выполнен расчет [8].

По результатам анализа в *SolidWorks* была получена собственная частота равная 1219,5 Гц, представленная на рисунке 1:

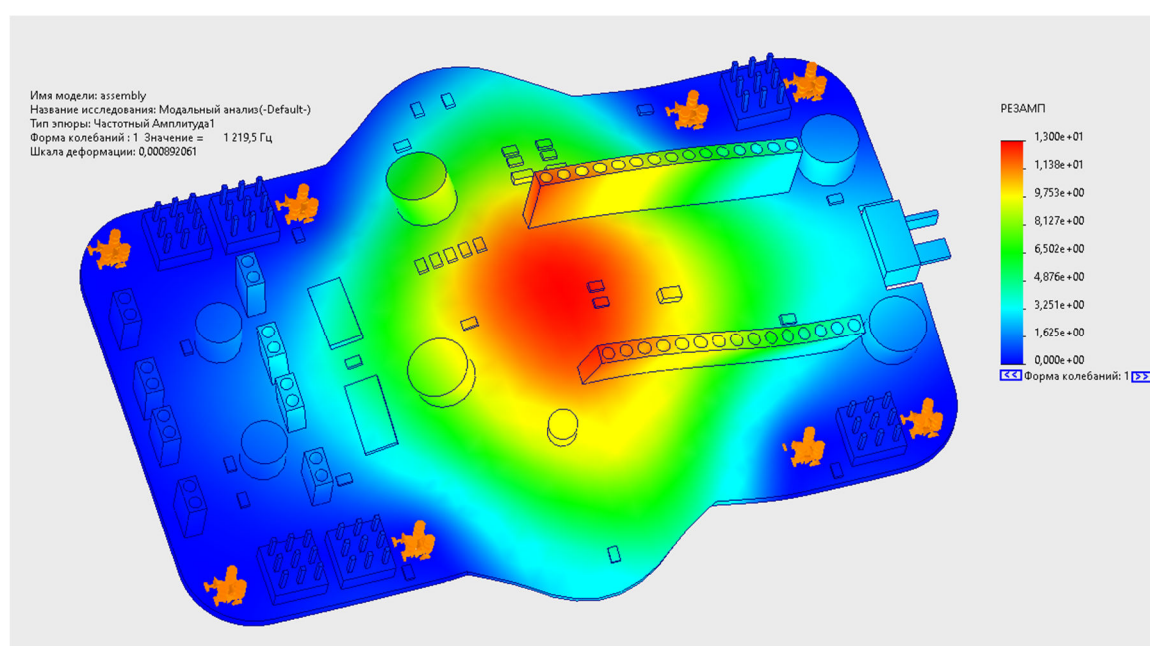


Рисунок 1 – Результат моделирования в программе *SolidWorks*

Также была определена форма колебаний. Анализ показал, что наибольшие перемещения возникают в центральной части платы. Это связано с тем, что края закреплены, а середина имеет меньшую жесткость.

Далее аналогичный анализ был выполнен в программе *COMSOL*. Эта система позволяет более гибко настраивать параметры расчета и учитывать различные физические процессы.

Для проведения анализа была использована та же геометрическая модель. В модуле *Structural Mechanics* был выбран режим расчета собственных частот. Как и в предыдущем случае, были заданы материалы, построена расчетная сетка и заданы граничные условия. Важно отметить, что совпадение условий необходимо для корректного сравнения результатов.

После выполнения расчета была получена собственная частота равная 1106,6 Гц, представленная на рисунке 2:

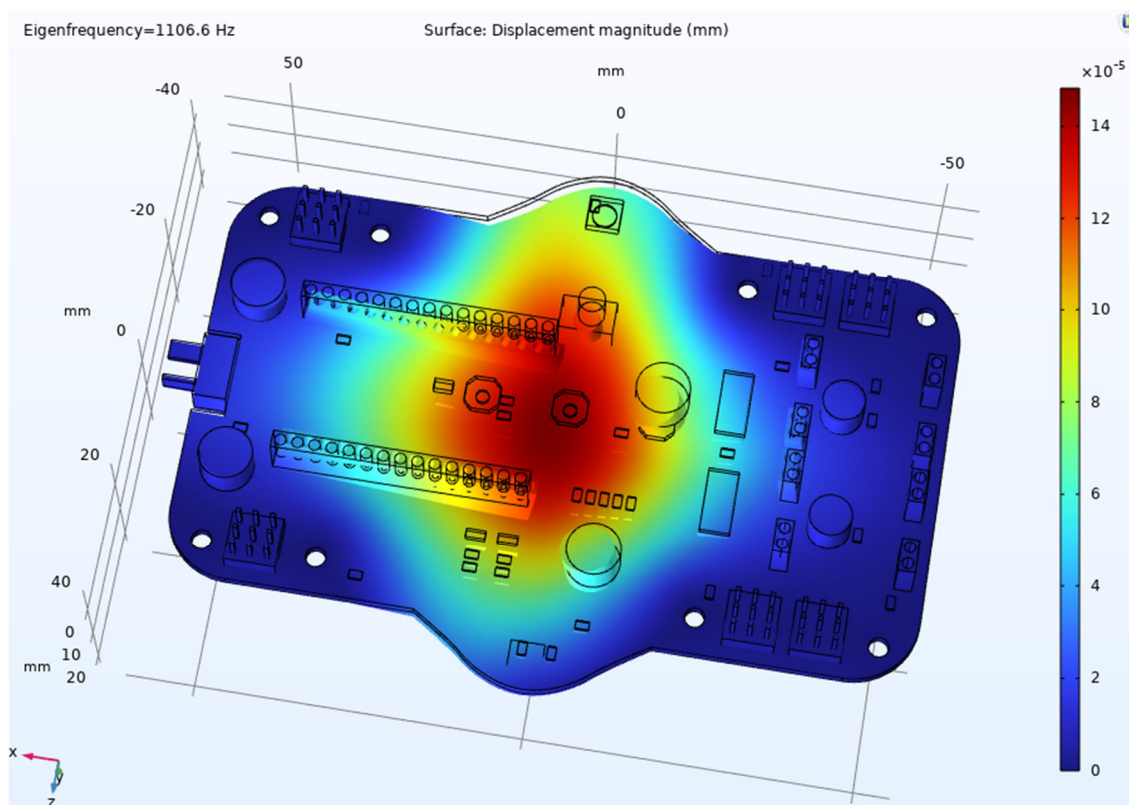


Рисунок 2 – Результат моделирования в программе *Comsol*

По результатам моделирования установлено, что собственная частота колебаний печатной платы составляет 1219,5 Гц в программном комплексе *SolidWorks* и 1106,6 Гц в *COMSOL*. Различие между полученными значениями составляет около 9,3 %, что объясняется различиями в используемых численных методах, особенностями построения расчётной сетки и алгоритмами, применяемыми в данных программных продуктах.

Несмотря на расхождение численных результатов, формы колебаний в обоих случаях оказались схожими. Максимальные деформации наблюдаются в центральной части печатной платы, в то время как области крепления остаются наименее подверженными перемещениям. Это свидетельствует о корректности выполненного моделирования и адекватности выбранных условий расчёта.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что исследуемая конструкция обладает достаточной механической жёсткостью, однако центральная область платы является наиболее нагруженной и может потребовать дополнительного усиления при необходимости повышения надёжности устройства. В целом проведённый анализ показывает, что использование *SolidWorks* удобно для быстрого получения оценочных результатов, тогда как *COMSOL* предоставляет более широкие возможности для детального инженерного анализа. Совместное применение данных программных средств позволяет повысить точность и достоверность расчётов при проектировании печатных плат.

Список литературы

1. Segatello, M. Hexapod con ESP32 / M. Segatello // *Elettronica In.* – №283. – С. 63-77.
2. Зиновьев, Д. В. Основы моделирования в *SolidWorks* / Д. В. Зиновьев. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 240 с.
3. Алексеев, В. Ф. Моделирование тепловых полей электронных систем в среде ANSYS / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // *BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции*, Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 282–286.
4. Алексеев, В. Ф. Методика численного моделирования тепловых процессов в микроэлектронных структурах / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // *BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф.*, Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 34–37.

5. Программное обеспечение инженерного моделирования физических процессов. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1 : Тепловые режимы работы и защиты конструкций РЭС от механических воздействий : пособие / В. Ф. Алексеев, И. Н. Богатко, Г. А. Пискун. – Минск : БГУИР, 2017. – 124 с.

6. Введение в COMSOL Multiphysics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf. – Дата доступа: 20.03.2026.

7. Частотный анализ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://help.solidworks.com/2021/Russian/SolidWorks/cworks/c_Frequency_Analysis.htm – Дата доступа: 27.03.2025.

8. G.A. Dymov, V.P. Belichenko. The main structural element of a reinforced concrete support: mathematical modeling of mechanical vibrations // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021.

UDC 004.94:621.396.6:534.1

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODELING THE NATURAL FREQUENCY OF A MULTI-CHANNEL SERVO MOTOR CONTROL PCB IN SOLIDWORKS AND COMSOL

Bystrou M.Y.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alexseev V.F. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. This paper considers the process of determining the natural frequencies of a printed circuit board (PCB) of an electronic servo motor control unit. The analysis was performed using two software tools – SolidWorks and COMSOL. During the simulation, a three-dimensional model of the PCB with mounted components was created, material properties and boundary conditions were defined, and a frequency analysis was carried out.

As a result, it was found that the natural frequency of the structure is 1219.5 Hz in SolidWorks and 1106.6 Hz in COMSOL. A comparison of the results was performed and the differences were evaluated. It is shown that despite some discrepancies, both programs demonstrate a similar behavior of the structure.

Keywords: printed circuit board, natural frequency, frequency analysis, vibrations, modeling, SolidWorks, COMSOL

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ МОЩНОГО POWER BANK ДЛЯ НОУТБУКА И ГАДЖЕТОВ В ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ SOLIDWORKS И COMSOL

Ходас В.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Алексеев В.Ф. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Экспериментально исследованы методы оценки собственной частоты колебаний печатной платы мощного *power bank* для ноутбука и гаджетов с электронными компонентами на ней с помощью программных пакетов *SolidWorks* и *Comsol*. Установлено, что собственная частота колебаний печатной платы в программе *SolidWorks* составила 198 Гц, в программе *Comsol* – 209 Гц. Сделан вывод о необходимости использования каждой из программ для решения определенных инженерных задач в зависимости от входных данных.

Ключевые слова: *SolidWorks*, *Comsol*, печатная плата, инженерное моделирование, собственная частота, частотный анализ

Введение. Современные электронные устройства, такие как мощные *power bank* для ноутбуков и гаджетов, требуют высокой надежности при различных нагрузках. Механические характеристики печатных плат определяют, в основном, надежность всего устройства в целом. Ключевым аспектом обеспечения механической устойчивости печатной платы является анализ собственных частот колебаний, предотвращающий явление резонанса.

В статье автором показано, что каждый программный комплекс имеет свои преимущества и недостатки, а также разные подходы к решению инженерных задач, что обеспечивает минимальную погрешность результатов в сравнении друг с другом.

Основная часть. Сравнительный анализ *SolidWorks* и *COMSOL* в контексте моделирования собственных частей колебаний печатных плат выявляет ключевые различия между этими программами при решении инженерных задач. *SolidWorks* выигрывает за счет простоты использования и интуитивного интерфейса для твердотельного моделирования, но уступает в глубине детального инженерного анализа. *COMSOL*, напротив, предлагает высокую точность расчетов, хотя и требует больше времени на освоение из-за менее удобного интерфейса [1–5].

Для проведения сравнительного анализа было выбрано современное устройство с высокой плотностью элементов на плате. Первоначально в *SolidWorks* была построена твердотельная геометрическая модель мощного *power bank* для ноутбука и гаджетов, включая все электронные компоненты (рисунок 1).

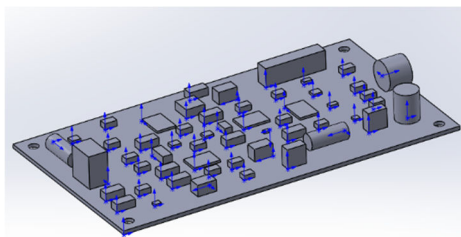


Рисунок 1 – Геометрическая модель платы мощного power bank для ноутбука и гаджетов

С помощью модуля «*Simulation*» программного комплекса *SolidWorks* был создан новый проект с типом исследования «Частота». Для каждого электронного компонента был задан

свой материал, как и для печатной платы. Граничными условиями в виде фиксированной геометрии являются крепежные отверстия по углам платы. Создание сетки данной модели позволило завершить настройку проекта и перейти к расчету. Результат моделирования представлен на рисунке 2.

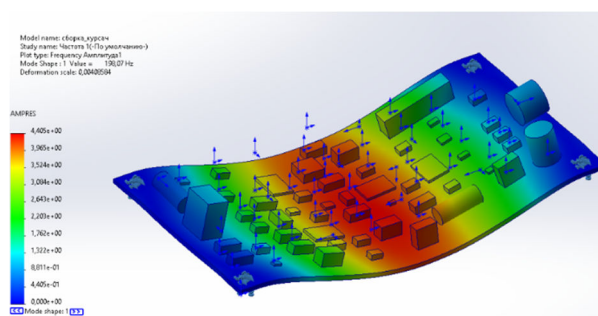


Рисунок 2 – Результат моделирования в программе SolidWorks

По результатам проведенного моделирования в программе *SolidWorks* собственная частота колебаний печатной платы мощного *power bank* для ноутбука и гаджетов с электронными компонентами на ней составила 198 Гц.

COMSOL является интегрированной средой моделирования, позволяющей использовать геометрические модели из других популярных *CAD*-систем, таких как, например, *SolidWorks*. Используя уже готовую твердотельную модель печатной платы с электронными компонентами на ней с помощью модуля «*Structural Mechanics*» и типа исследования «*Eigenfrequency*», был создан новый проект. По аналогии с настройкой моделирования в *SolidWorks* для каждого элемента, включая печатную плату, были заданы материалы и создана сетка. Граничные условия в виде фиксированной геометрии не изменились. Результат моделирования представлен на рисунке 3.

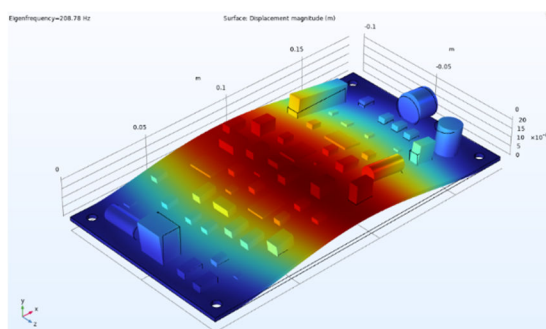


Рисунок 3 – Результат моделирования в программе Comsol

По результатам проведенного моделирования в программе *Comsol* собственная частота колебаний печатной платы мощного *power bank* для ноутбука и гаджетов с электронными компонентами на ней составила 209 Гц.

Заключение. Сравнительный анализ моделирования собственных частот колебаний печатной платы мощного *power bank* для ноутбука и гаджетов в программных комплексах *SolidWorks* и *COMSOL* показал различия в подходах и результатах. *SolidWorks* обеспечивает простоту использования и интуитивно понятный интерфейс, что делает его удобным для базового проектирования и анализа. *COMSOL*, в свою очередь, предлагает более высокую точность и гибкость в решении сложных инженерных задач, что делает его предпочтительным выбором для детализированного моделирования. Использование *COMSOL* позволило получить более детальные и точные результаты, несмотря на более сложный и настраиваемый интерфейс.

По результатам исследования собственная частота колебаний печатной платы мощного *power bank* для ноутбука и гаджетов с электронными компонентами на ней составила 198 Гц

в программном комплексе *SolidWorks* и 209 Гц – в программном комплексе *COMSOL*. Погрешность результатов друг относительно друга составила 5,2 %.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что *SolidWorks* является программой, предназначенной в первую очередь для твердотельного моделирования, но способной справляться с простыми инженерными задачами наравне с более сложными и специализированными программными продуктами. Примером такого программного продукта может служить *COMSOL*. Эта программа имеет более сложный интерфейс и не предназначена для твердотельного моделирования, однако более оптимизирована для решения инженерных задач любой сложности.

Кроме того, геометрическая модель может быть создана средствами программы *SolidWorks*, а численное моделирование проведено средствами *COMSOL*. Данное решение является наиболее оптимальным для решения инженерных задач любого вида и сложности.

Список литературы

1. Amy, R Reliability analysis of electronic equipment subjected to shock and vibration / R Amy, G Aglietti, G Richardson // *Shock and Vibration*. – 2009. – № 16. – С. 45-59.
2. Программное обеспечение инженерного моделирования физических процессов. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1 : Тепловые режимы работы и защиты конструкций РЭС от механических воздействий : пособие / В. Ф. Алексеев, И. Н. Богатко, Г. А. Пискун. – Минск : БГУИР, 2017. – 124 с.
3. Алексеев, В. Ф. Моделирование тепловых полей электронных систем в среде ANSYS / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // *BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции*, Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 282–286.
4. Алексеев, В. Ф. Методика численного моделирования тепловых процессов в микросистемных структурах / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // *BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф.*, Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 34–37.
5. G.A. Dymov, V.P. Belichenko. The main structural element of a reinforced concrete support: mathematical modeling of mechanical vibrations // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021.

UDC 004.94:621.396.6:534.1

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODELING THE NATURAL FREQUENCY OF VIBRATION OF A POWERFUL POWER BANK FOR LAPTOP AND GADGETS PCB IN SOLIDWORKS AND ANSYS SOFTWARE SUITES

Khodas V.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alexseev V.F. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. Methods for estimating the natural frequency of oscillations of a PCB of a powerful power bank for a laptop and gadgets with electronic components on it were experimentally studied using the SolidWorks and Comsol software packages. It was found that the natural vibration frequency of the printed circuit board in the SolidWorks program was 198 Hz, in the Comsol program - 209 Hz. It is concluded that it is necessary to use each of the programs to solve certain engineering problems depending on the input data.

Keywords: SolidWorks, Comsol, Printed Circuit Board (PCB), Engineering Modeling, Natural Frequency, Frequency Analysis

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОЩНОГО HI-FI УСИЛИТЕЛЯ ЗВУКА НА ОСНОВЕ МИКРОСХЕМЫ STK4231 В ГЕРМЕТИЧНОМ КОРПУСЕ

Коротков А.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Алексеев В.Ф. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. В статье представлен общетехнический анализ проектируемого усилителя мощности звуковой частоты. Выполнен анализ существующих технических решений, обоснован выбор оптимальной схмотехнической реализации. Особое внимание уделено вопросам обеспечения теплового режима работы усилителя, включая моделирование тепловых процессов и выбор эффективных систем охлаждения с учетом требований герметичного корпуса.

Ключевые слова: усилитель звука, Hi-Fi, проектирование

Введение. Усилители звука являются ключевыми компонентами современных аудиосистем, предназначенными для увеличения амплитуды звукового сигнала и обеспечения его воспроизведения через акустические системы. *Hi-Fi* усилители звука, в частности, отличаются высокой точностью воспроизведения и минимальными искажениями, что делает их востребованными в различных областях, включая музыкальную индустрию, кино, телевидение и домашние аудиосистемы. Современные усилители могут иметь различные конструкции и технологии, включая ламповые и транзисторные модели, а также цифровые усилители, которые обеспечивают высокое качество звука и энергоэффективность. Важно отметить, что выбор усилителя зависит от конкретных задач и условий использования, таких как тип акустической системы, размер помещения и желаемый уровень громкости.

Общетехнический анализ проектируемого устройства. Усилитель звука – это устройство, предназначенное для увеличения амплитуды аудиосигнала, поступающего от источника (например, проигрывателя или компьютера), чтобы обеспечить его воспроизведение через акустическую систему. Мощные усилители способны выдавать до 1000 Вт, что позволяет им эффективно управлять большими динамиками и обеспечивать громкий и качественный звук.

Помимо основной функции, усилители выполняют замену аналогового сигнала в импульсный для будущей обработки цифровым блоком.

Устройство помогает настроить данные производимых устройств, уменьшить потребление электроэнергии, при этом лишь улучшая работоспособность. Заряжается усилитель благодаря блокам питания, которые бывают встроенные и выносные, а также делятся на классы *A*, *B*, *AB*, *C* [1].

В статье рассматривается транзисторный усилитель (рисунок 1), в котором основными преимуществам использования являются [2]:

- мгновенная готовность к работе (устройство начинает работать сразу же после запуска и не требует прогрева);

- прочность (транзисторный усилитель в зависимости от лампового обладает высоким показателем механической прочности, что делает его более надежным и практичным для использования);

- доступная стоимость транзистора (благодаря этому не только снижается стоимость прибора, но и цена ремонтных работ при выходе из строя транзисторов);

- длительный срок службы (ламповые усилители мощности служат долго, но их срок службы все равно ограничен, это связано с потерей эмиссии у ламп. Транзисторы перегорают

редко и даже в этом случае для восстановления работоспособности устройства достаточно заменить недорогие транзисторы новыми и усилитель снова готов к работе);

- компактные размеры (это связано с небольшим весом и размерам транзисторов, благодаря малому весу и габаритам устройство проще транспортировать и легче найти для него место среди звуковой аппаратуры);

- отсутствие необходимости использовать выходной трансформатор (это позволяет добиться характеристик, которые невозможных у ламповых усилителей).



Рисунок 1 – Внешний вид устройства

Устройство эксплуатируется в лабораторных, капитальных жилых и других подобного типа помещениях, поэтому целесообразно выбрать устойчивость к климатическим воздействиям по ГОСТ 15150-69 УХЛ 4.2.

Для моделирования тепловой картины поля будет использоваться программа *ELCUT* – это компьютерная программа для проведения инженерного анализа и двумерного моделирования методом конечных элементов [7–12].

Описание принципа работы анализируемого устройства. Транзисторный усилитель мощности звука – это устройство, которое усиливает электрические аудиосигналы, чтобы обеспечить мощность, необходимую для воспроизведения звука. Принцип работы такого усилителя основан на использовании транзисторов как активных элементов, которые изменяют свои характеристики под воздействием входного сигнала, а именно (рисунок 2) [3]:

- сигнал поступает на вход предварительного усилителя, который обрабатывает и усиливает его до нужного уровня. Этот этап важен для подготовки сигнала к дальнейшему усилению, так как он обеспечивает необходимую величину входного сопротивления и минимизирует нагрузку на источник сигнала. Предварительный усилитель также помогает снизить уровень шумов, что критично для достижения чистоты звука;

- усилитель состоит из нескольких каскадов, каждый из которых последовательно усиливает сигнал. Выход одного каскада подключается к входу следующего, что позволяет многократно увеличить мощность сигнала. Каждый каскад может быть настроен на определенное значение усиления, что дает возможность контролировать выходной сигнал и снижать искажения;

- транзисторы в усилителе изменяют свое сопротивление в ответ на входной сигнал. Это свойство позволяет им управлять потоком тока от источника питания к нагрузке, обеспечивая тем самым необходимую мощность на выходе. Транзисторы работают в линейном режиме, что минимизирует искажения и позволяет достичь высокого качества звука;

- после прохождения через все каскады, на выходе получается мощный сигнал, который передается на акустические системы для воспроизведения звука. Этот сигнал должен быть как можно менее искаженным, чтобы обеспечить качественное звучание.

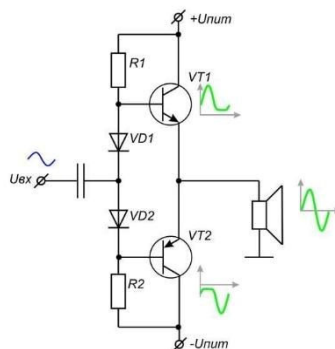


Рисунок 2 – Схема преобразования сигналов в усилителе мощности звука

В нашем случае транзисторный усилитель мощности звука имеет выходную мощность 100 Вт и диапазон воспроизводимых частот 0,02–20 кГц. Из этого следует, что данное устройство больше подходит для не очень больших помещений [4].

Анализ элементарной базы устройства. Схема электрическая принципиальная транзисторного моноусилителя звука на микросхеме *STK4231* (рисунок 3) включает в себя следующие основные компоненты:

- микросхема *STK4231*: является основным элементом усилителя и отвечает за усиление звукового сигнала;
- резисторы: используются для установки необходимых режимов работы транзисторов и формирования частотной характеристики усилителя;
- конденсаторы: применяются для разделения каскадов усилителя по постоянному току и формирования частотной характеристики;
- транзисторы: используются в качестве активных элементов для усиления звукового сигнала;
- диоды: применяются для защиты усилителя от перенапряжений и обратной полярности.

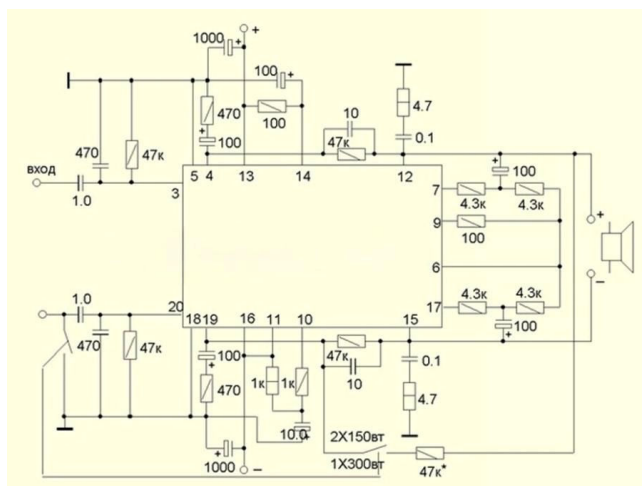


Рисунок 3 – Схема электрическая принципиальная усилителя мощности звука на микросхеме *STK4231*

Для наглядного представления температур при различных тепловых режимах работы были составлены аналоги тепловых моделей с помощью программного комплекса *ELCUT* [11]. Для получения конечного результата в виде наглядной картины теплового поля в типе задач «теплопередача стационарная» можно настроить условия для отдельных участков модели. При всем этом, так же можно обозначить не только место нагревания на плате и теплопроводность элементов, но и настроить граничные условия для каждого из них.

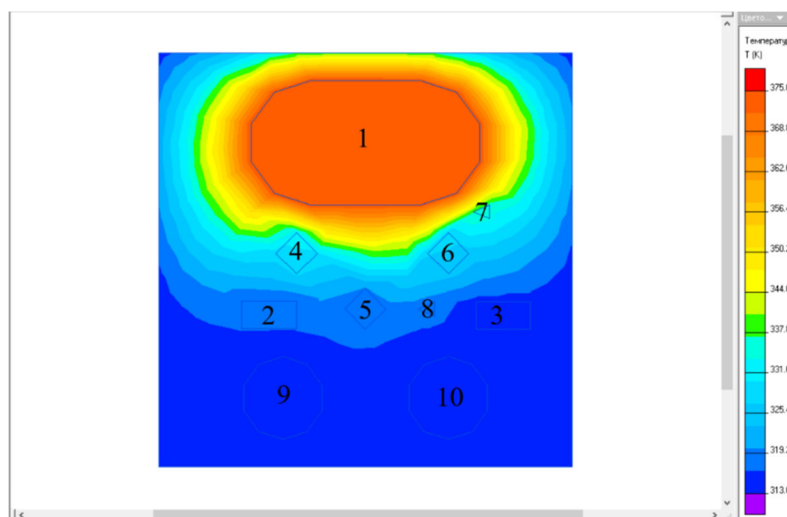


Рисунок 4 – Тепловая картина поля в герметичном корпусе
1 – микросхема STK4231; 2, 3 – резисторы; 4 – 10 – конденсаторы

Герметичный корпус для РЭС представляет собой защитную оболочку, обеспечивающую изоляцию внутренних компонентов от внешних факторов, таких как влага, пыль и механические повреждения. Эти корпуса изготавливаются из прочных материалов, устойчивых к коррозии, и проектируются с учетом климатических условий, что позволяет им функционировать в широком температурном диапазоне [5].

Тепловая картина, представленная на рисунке 4, показывает, что максимальная температура внутри герметичного корпуса достигает 375 К (или 102 °С), что ниже рабочей температуры транзистора, равной 423 К (или 150 °С). В то же время температура окружающей среды вокруг элемента, вызванная нагревом чипа, достигает 362,6 К (соответствует 89,6 °С). Температура в нагретой зоне составляет 325,4 К (эквивалентно 52,4 °С). Этот тип охлаждения является наименее эффективным: хотя температура микросхемы STK4231 не достигает предельной рабочей температуры, температура нагретой зоны близка к рабочей температуре некоторых компонентов. Это может привести к сокращению их срока службы при длительной эксплуатации в таких условиях.

Заключение. В заключение следует подчеркнуть, что общетехнический анализ является неотъемлемой частью процесса проектирования любого современного устройства. Он позволяет не только определить оптимальные технические решения, но и научно обосновать их, обеспечивая высокую надежность, экономическую эффективность и конкурентоспособность разрабатываемого продукта. Комплексный анализ исходных данных, существующих аналогов, выбор принципа действия и структуры устройства, разработка принципиальной схемы, расчет основных параметров, конструирование устройства и оценка экономической эффективности представляют собой взаимосвязанные этапы проектирования, обеспечивающие успешную реализацию проекта. Представленный в данной статье общетехнический анализ разрабатываемого устройства позволил определить основные направления дальнейших исследований и разработок, а также оценить потенциальные преимущества предлагаемого решения с учетом существующих технологических ограничений и экономических факторов.

Список литературы

1. Зачем нужен усилитель звука. [Online resource] – 2025. – Access mode: <https://droidone.ru/zachem-nuzhen-usilitel-zvuka>
2. STK4231III Datasheet (PDF) - Sanyo Semicon Device [Online resource] – 2025. – Access mode: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/41608/SANYO/STK4231III.html>
3. Rotkop L.L., Spokoyny Yu.E. Ensuring thermal regimes in the design of radio electronic equipment: study guide. Moscow : Glavpochtamt, 1976. – 231 p.
4. Усилитель мощности звука [Online resource] – 2025. – Access mode: https://radioskot.ru/publ/unch/usilitel_moshhnosti_zvuka/6-1-0-203
5. Power Amplifier [Online resource] – 2024. – Access mode: <https://trueconf.ru/blog/wiki/usilitel-moshhnosti-zvuka>

6. Оптимизация теплового режима приемно-передающего устройства по результатам моделирования тепловых процессов в среде *SolidWorks Flow Simulation* / Пискун Г. А., Алексеев В. Ф., Романовский П. С., Стануль А. А. // *Znanstvena misel journal*. – 2019. – Vol. 1, № 35. – P. 47–60.

7. Алексеев, В. Ф. Методика численного моделирования тепловых процессов в микроэлектронных структурах / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // *BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3* / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 34–37.

8. Алексеев, В. Ф. Принципы конструирования и автоматизации проектирования РЭУ: Учеб. пособие / В. Ф. Алексеев. – Мн.: БГУИР, 2003. – 197 с.

9. Алексеев, В. Ф. Программная реализация процесса оценки теплового режима средства медицинской электроники / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // *Медэлектроника* – 2018. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей XI Международная научно-техническая конференция, Минск, 5–6 декабря 2018 г. / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2018. – С. 255–258.

10. Программное обеспечение инженерного моделирования физических процессов. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1 : Тепловые режимы работы и защиты конструкций РЭС от механических воздействий : пособие / В. Ф. Алексеев, И. Н. Богатко, Г. А. Пискун. – Минск : БГУИР, 2017. – 124 с.

11. Алексеев, В. Ф. Физические основы проектирования радиоэлектронных средств. Лабораторный практикум : пособие в 2 ч. Ч. 1 : Моделирование физических процессов в радиоэлектронных средствах с помощью программных комплексов / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун. – Минск : БГУИР, 2016. – 70 с.

12. Физические основы проектирования радиоэлектронных средств. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 2 : Исследование физических процессов в конструкциях РЭС : пособие / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, И. Н. Богатко. – Минск : БГУИР, 2017. – 74 с.

UDC 621.396.6

THE PHYSICAL BASICS OF DESIGNING A POWERFUL HI-FI SOUND AMPLIFIER BASED ON THE STK4231 MICROCIRCUIT IN A SEALED CASE

Korotkov A.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alexseev V.F. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. This paper presents a general technical analysis of the projected audio frequency power amplifier. The analysis of existing technical solutions is carried out, the choice of optimal circuit design is justified. Special attention is paid to the issues of ensuring the thermal operation of the amplifier, including the modeling of thermal processes and the selection of efficient cooling systems, taking into account the requirements of a sealed enclosure.

Keywords: sound amplifier, Hi-Fi, design

АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ОТЛАДОЧНОЙ ПЛАТЫ С МИКРОКОНТРОЛЛЕРОМ MG32F103RBT6

Кот Я.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Яцук В.А. – магистр, ассистент кафедры ПИКС

Аннотация. В работе проведён сравнительный анализ методов определения собственной частоты колебаний отладочной платы с микроконтроллером *MG32F103RBT6*, содержащей набор периферийных элементов (дисплей, датчики, память, интерфейсы). Моделирование выполнено в программных комплексах *SolidWorks*, *Ansys* и *Comsol*. Полученные значения собственной частоты составили: 486,19 Гц (*SolidWorks*), 500,11 Гц (*Ansys*), 491,13 Гц (*Comsol*). Максимальное расхождение результатов не превысило 2,8 %, что подтверждает корректность применяемых моделей.

Ключевые слова: печатная плата, отладочная плата, *SolidWorks*, *Ansys*, *Comsol*, собственная частота, частотный анализ

Введение. Современные отладочные платы микроконтроллеров представляют собой сложные электронные устройства, включающие большое количество компонентов: микроконтроллер, элементы питания, интерфейсы связи, датчики и индикаторы. Надёжность таких устройств во многом определяется механической устойчивостью печатной платы [1–8].

Наличие большого числа компонентов приводит к неравномерному распределению массы и жёсткости, что делает задачу анализа собственных частот особенно актуальной. Это необходимо для предотвращения резонансных явлений при эксплуатации устройства.

Основная часть. Исследуемая отладочная плата представляет собой электронный модуль с установленными на ней компонентами различной массы и геометрии. Наличие как малогабаритных *SMD*-компонентов, так и относительно массивных элементов приводит к сложной структуре распределения масс, что необходимо учитывать при моделировании.

Для проведения анализа была построена трёхмерная геометрическая модель платы с учетом основных компонентов. При этом каждому элементу были назначены соответствующие физико-механические свойства, включая плотность, модуль упругости и коэффициент Пуассона. В качестве материала печатной платы использовался стеклотекстолит, а для компонентов применялись усреднённые характеристики полупроводниковых и металлических материалов. Граничные условия задавались в виде фиксирования платы в областях крепёжных отверстий, что соответствует реальным условиям её монтажа (рисунок 1) [2].

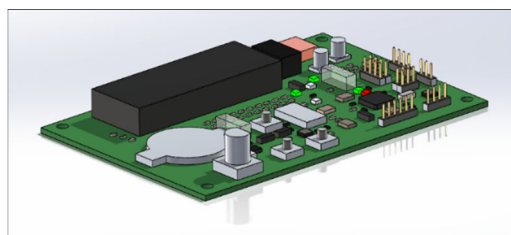


Рисунок 1 – Модель платы

В программном комплексе *SolidWorks* (рисунок 3) моделирование проводилось с использованием модуля *Simulation* в режиме частотного анализа. Данный подход позволяет

относительно быстро получить оценку собственных частот конструкции при сравнительно простой настройке модели. В результате расчёта было установлено, что первая собственная частота колебаний платы составляет 486,19 Гц. Следует отметить, что *SolidWorks* ориентирован в первую очередь на твердотельное моделирование, поэтому при анализе могут использоваться упрощённые допущения, влияющие на точность результатов [4].

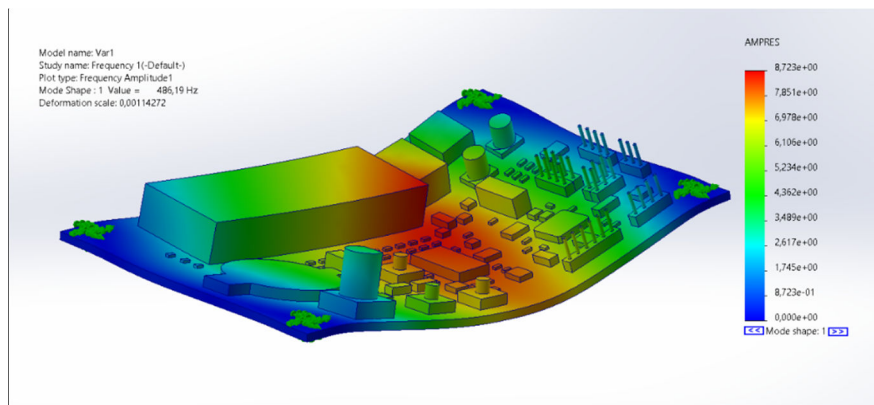


Рисунок 2 – Результат моделирования в программе *SolidWorks*

Дальнейший анализ был выполнен в программном комплексе *Ansys* (рисунок 3), который предоставляет более широкие возможности для конечно-элементного моделирования. Геометрическая модель была импортирована из *SolidWorks*, после чего выполнена генерация более детализированной сетки конечных элементов. Особое внимание уделялось корректному заданию контактных взаимодействий и распределения масс компонентов. В результате проведённого анализа собственная частота колебаний составила 500,11 Гц. Полученное значение несколько выше результата *SolidWorks*, что объясняется более точным учётом жесткости конструкции и особенностей взаимодействия элементов [3, 5].

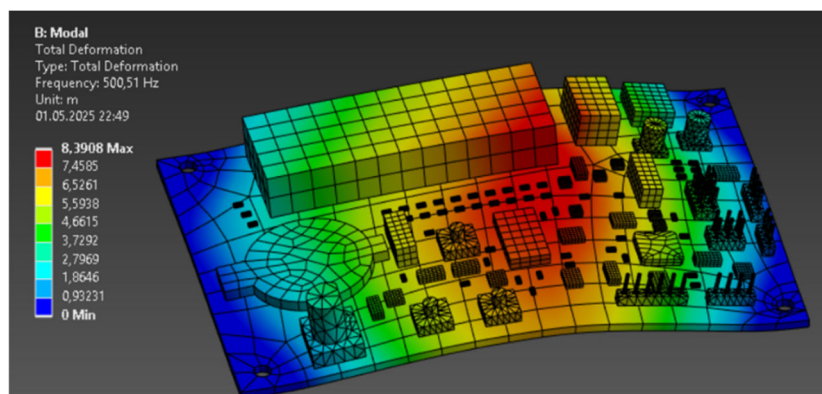


Рисунок 3 – Результат моделирования в программе *Ansys*

В программной среде *Comsol Multiphysics* (рисунок 4) также был выполнен модальный анализ с использованием аналогичных исходных данных. *Comsol* позволяет учитывать мультифизические эффекты, однако в рамках данной работы рассматривалась только механическая составляющая. Результат расчёта показал, что собственная частота равна 491,13 Гц, что находится между значениями, полученными в *SolidWorks* и *Ansys*. Это свидетельствует о сбалансированности используемой модели и адекватности принятых допущений.

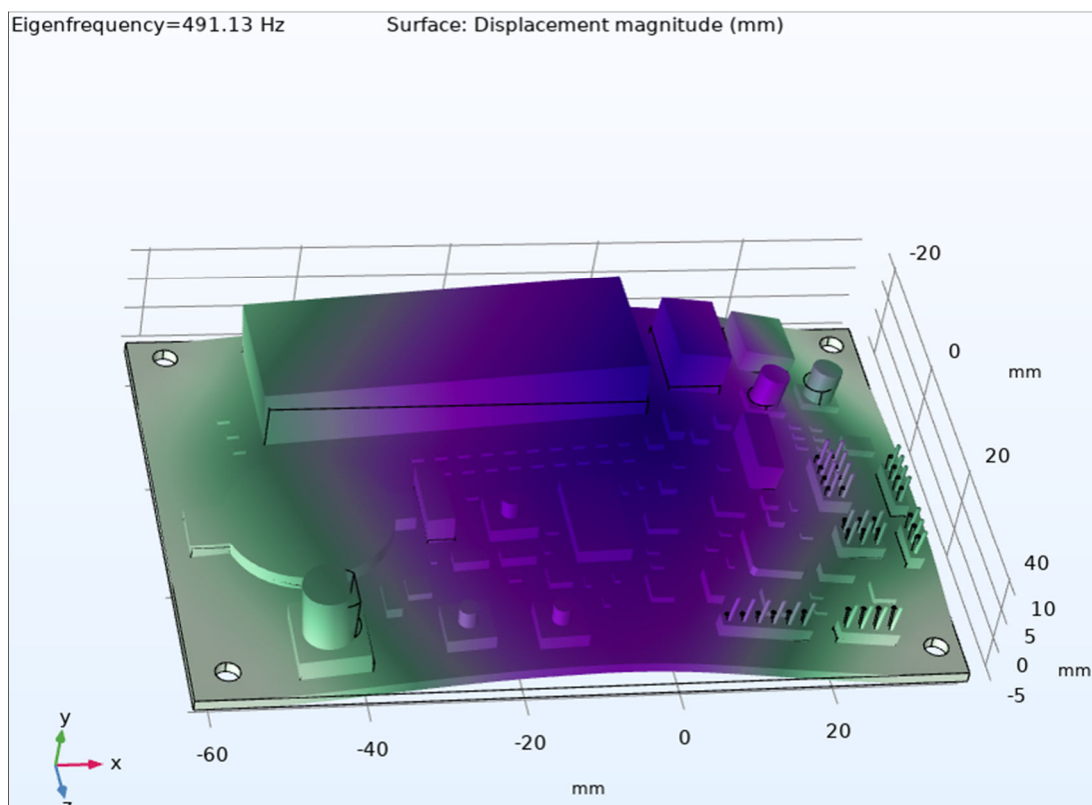


Рисунок 4 – Результат моделирования в программе *Comsol*

Сравнение результатов показывает, что все три программных комплекса дают близкие значения собственной частоты, несмотря на различия в алгоритмах расчёта и уровне детализации моделей. Максимальное расхождение между результатами составляет 2,8 %, что можно считать допустимым для инженерных расчётов данного типа. Небольшие различия объясняются особенностями реализации конечно-элементных методов, а также различиями в способах задания граничных условий и свойств материалов.

Заключение. Проведённое исследование показало, что моделирование собственной частоты колебаний отладочной платы с микроконтроллером *MG32F103RBT6* в различных программных комплексах даёт согласующиеся результаты. Несмотря на различия в подходах к моделированию, все рассмотренные системы позволяют получить достоверную оценку динамических характеристик конструкции.

Установлено, что собственная частота колебаний исследуемой платы находится в диапазоне от 486 до 500 Гц. Полученные значения подтверждают, что конструкция обладает достаточной механической жёсткостью и не подвержена резонансным явлениям в большинстве эксплуатационных условий. *SolidWorks* может эффективно использоваться на этапе предварительного проектирования благодаря простоте применения, тогда как *Ansys* и *Comsol* обеспечивают более высокую точность расчётов и подходят для проведения детального инженерного анализа.

Список литературы

1. Моделирование механических характеристик многослойных печатных плат средствами САЕ анализа / З. Х. М. Аль-Араджи [и др.] // «Надёжность и качество». – 2018. – Т. 1. – С. 224-227
2. Зиновьев, Д. В. Основы моделирования в *SolidWorks* / Д. В. Зиновьев. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 240 с.
3. *Ansys Mechanical Expert Review, Pricing and Alternatives* – 2025 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.worquick.com/post/ansys-review> – Дата доступа: 27.03.2025.
4. Частотный анализ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://help.solidworks.com/2021/Russian/SolidWorks/cworks/c_Frequency_Analysis.htm – Дата доступа: 27.03.2025.
5. Программное обеспечение инженерного моделирования физических процессов. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1 : Тепловые режимы работы и защиты конструкций РЭС от механических воздействий : пособие / В. Ф. Алексеев, И. Н. Богатко, Г. А. Пискун. – Минск : БГУИР, 2017. – 124 с

6. Физические основы проектирования радиоэлектронных средств. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 2 : Исследование физических процессов в конструкциях РЭС : пособие / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, И. Н. Богатко. – Минск : БГУИР, 2017. – 74 с.

7. Алексеев, В. Ф. Методика численного моделирования тепловых процессов в микроэлектронных структурах / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // *BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф.*, Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 34–37.

8. Алексеев, В. Ф. Математическое моделирование как средство оптимизации параметров силовых интегральных микросхем / В. Ф. Алексеев, А. Д. Сыс, Г. А. Пискун // *Interdisciplinary research: scientific horizons and perspectives : II International Scientific and Theoretical Conference, Vilnius, October 1, 2021 / European Scientific Platform*. – Vilnius, 2021. – P. 109–113. – DOI : <https://doi.org/10.36074/scientia-01.10.2021>.

UDC 621.3.049.77:004.942

ANALYSIS OF THE SIMULATION OF THE NATURAL FREQUENCY OF THE DEBUG BOARD WITH THE MG32F103RBT6 MICROCONTROLLER

Kot Y.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

*Yashchuk V.A. – master's degree student, Assistant Professor, Department of Information
and Computer Systems Design*

Annotation. The paper presents a comparative analysis of methods for determining the natural frequency of oscillation of a debugging board with an MG32F103RBT6 microcontroller, which contains a set of peripheral elements (display, sensors, memory, and interfaces). The modeling was performed using the SolidWorks, Ansys, and Comsol software packages. The obtained values of the natural frequency were 486.19 Hz (SolidWorks), 500.11 Hz (Ansys), and 491.13 Hz (Comsol). The maximum discrepancy in the results did not exceed 2.8%, which confirms the correctness of the applied models.

Keywords: PCB, debug board, SolidWorks, Ansys, Comsol, natural frequency, frequency analysis

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА В ГЕРМЕТИЧНОМ И ПЕРФОРИРОВАННОМ КОРПУСАХ ДЛЯ ПЛАТЫ USB-UART АДАПТЕРА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ SOLIDWORKS

Мерзляков Д. П.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Яцук В.А. – магистр, ассистент кафедры ПИКС

Аннотация. В статье представлен сравнительный анализ моделирования в программном комплексе SolidWorks (модуль Flow Simulation) теплового режима печатной платы USB-UART адаптера, размещённой в герметичном и перфорированном корпусах. Рассматриваются особенности формирования тепловых потоков в замкнутом объёме и при естественной конвекции через перфорационные отверстия, а также влияние конструктивных параметров корпуса на максимальную температуру элементов. На основе результатов теплового моделирования предлагаются рекомендации по выбору типа корпуса и граничных условий при вычислительном эксперименте для обеспечения допустимого теплового режима печатной платы USB-UART адаптера.

Ключевые слова: SolidWorks, печатная плата, инженерное моделирование, герметичный корпус, перфорированный корпус, движение потоков воздуха, тепловой режим.

Введение. Современные интерфейсные устройства, такие как USB-UART адаптеры, широко применяются в составе измерительных, коммуникационных и встраиваемых систем, что предъявляет повышенные требования к их надёжности и устойчивости к тепловым воздействиям. Для электронных модулей малой мощности перегрев компонентов, вызванный ограниченным теплоотводом, может приводить к снижению ресурса, дрейфу параметров и отказам в условиях длительной эксплуатации [1–7].

В настоящей работе показано сравнение тепловых режимов для двух типов корпусов, описан шаблон постановки и проведения моделирования, а также даны рекомендации по выбору типа корпуса для устройств схожих по габаритам и выделяемой мощности.

Основная часть. Целью исследования является сравнение карт распределения температур на печатной плате USB-UART адаптера в двух вариантах исполнения: герметичный корпус и перфорированный корпус. Основными интересующими параметрами являются максимальная температура наиболее нагруженных элементов и температура нагретой зоны.

В физическую модель теплового процесса включена теплопроводность в твёрдых телах (плата, электронные компоненты, корпус) и конвективный теплообмен между твёрдыми телами и воздухом. Само моделирование будет проводиться с учетом движения воздушных потоков. В качестве источников тепла рассматриваются объёмные тепловыделения нагруженных элементов, задаваемые в соответствии с электрической мощностью нагрузки USB-UART адаптера [1].

Для проведения моделирования создается новый проект во вкладке Flow Simulation. Далее происходит настройка размерности величин, определяется тип задачи – внутренняя, выбираются процессы, которые будут учитываться при решении, а именно течение жидкости/газа, теплопроводность в твердых телах и гравитация [2].

Материал печатной платы задаётся как стеклотекстолит с медными проводящими слоями, при этом в большинстве инженерных постановок допускается использование эквивалентных изотропных свойств с усреднённой теплопроводностью. Материалы корпусов элементов выбираются в соответствии с конструктивным вариантом (пластик, керамика, алюминий), материал корпуса – ABS пластик [3-4].

Для моделирования тепловых процессов в устройстве, температура окружающей среды будет равна максимально допустимой рабочей температуре – 40°C. Такое решение позволяет убедиться в работоспособности РЭУ при самых неблагоприятных условиях.

По итогам моделирования устройства в герметичном корпусе была получена картина теплового поля, представленная на рисунке 1.

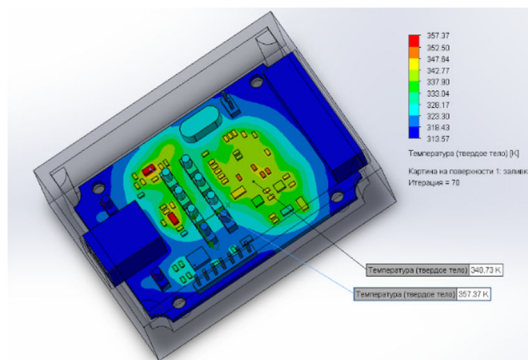


Рисунок 1 – Тепловая карта ПП в герметичном корпусе

По итогу проведенного моделирования максимальная температура на поверхности платы достигла 357K (83°C), а примерная температура нагретой зоны – 340K (66°C). Перегрев соответственно составил 43°C и 26°C. Движение потоков воздуха имело вид, представленный на рисунке 2.

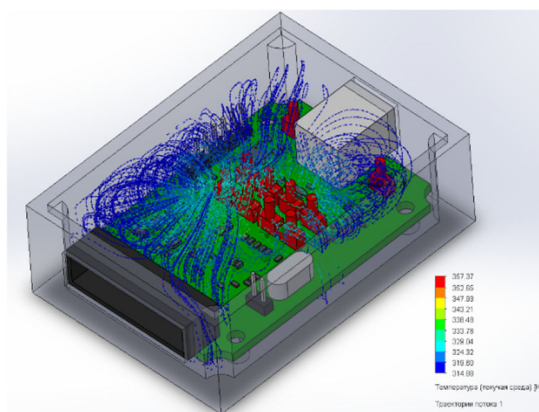


Рисунок 2 – Движение потоков воздуха в герметичном корпусе

На данном изображении можно увидеть, что примерно в центре ПП формируется восходящий поток перегретого воздуха, который охлаждается у верхней поверхности корпуса и, после остывания, расходится по краям устройства.

Для создания перфорированного корпуса, на основе (герметичном корпусе) были проделаны прямоугольные отверстия. Для возможности моделирования работы перфорационных отверстий создаются заглушки, перекрывающие все отверстия с каждой из сторон корпуса после чего им присваивается граничное условие «давление», имитирующее внешнюю среду.

По итогам моделирования устройства в герметичном корпусе была получена картина теплового поля, представленная на рисунке 3.

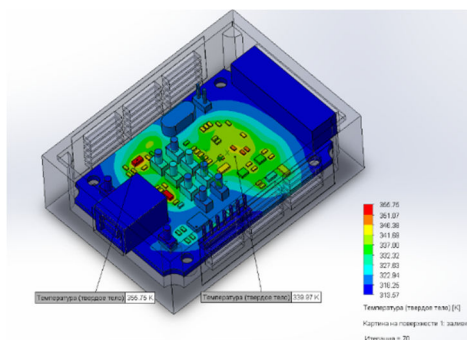


Рисунок 3 – Тепловая карта ПП в перфорированном корпусе

По итогу проведенного моделирования максимальная температура на поверхности платы достигла 355K (81°C), а примерная температура нагретой зоны – 339K (65°C). Перегрев соответственно составил 42°C и 21°C. Движение потоков воздуха имело вид, представленный на рисунках 4 и 5.

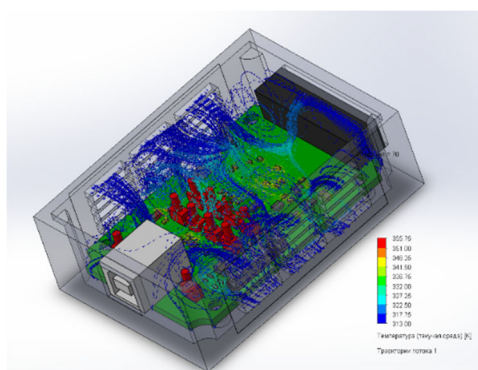


Рисунок 4 – Движение потоков воздуха в перфорированном

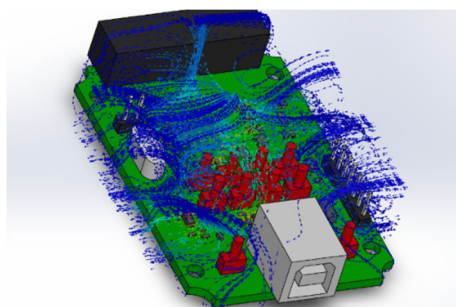


Рисунок 5 – Вид без корпуса

На приведенном выше изображении можно увидеть, что здесь формируется два основных канала прохода воздуха – верхний и нижний. Через нижний канал перегретый воздух покидает устройство, а через верхний канал в устройство поступает холодный воздух.

Заключение. Сравнительный анализ моделирования теплового режима в программном комплексе SolidWorks печатной платы USB-UART адаптера в герметичном и перфорированном корпусах показал несущественные различия в полученных температурах.

По результатам моделирования максимальная и примерная температуры нагретой зоны для герметичного составляют 357K (83°C) и 340K (66°C) соответственно, для перфорированного корпуса – 355K (81°C) и 339K (65°C) соответственно.

Проанализировав полученные данные, можно сказать, что наилучшие результаты показал перфорированный корпус. Максимум температуры в нем на 2 градуса меньше, а температура нагретой зоны – меньше на 1 градус.

Такое снижение максимальной температуры в устройстве не является существенным улучшением, которое могло бы однозначно определить выбор того или иного варианта исполнения корпуса. Исходя из полученных результатов, можно утверждать, что использование герметичного корпуса является достаточным и вполне оправданным, учитывая полученные результаты моделирования. Используя герметичный корпус можно добиться снижения стоимости устройства по сравнению с перфорированным корпусом и исключить воздействие на устройство пыли и влаги. Обобщая полученные результаты, можно утверждать: для маломощных устройств, помещенных в малогабаритные корпуса нет необходимости использования перфорированных корпусов, так как они не дают существенного уменьшения максимальных температур в устройстве.

Список литературы

1. Моделирование механических характеристик многослойных печатных плат средствами САЕ анализа / З. Х. М. Аль-Араджи [и др.] // «Надежность и качество». – 2018. – Т. 1. – С. 224-227
2. Зиновьев, Д. В. Основы моделирования в SolidWorks / Д. В. Зиновьев. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 240 с.
3. Ansys Mechanical Expert Review, Pricing and Alternatives – 2025 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.worquick.com/post/ansys-review> – Дата доступа: 27.03.2025.
4. Программное обеспечение инженерного моделирования физических процессов. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1 : Тепловые режимы работы и защиты конструкций РЭС от механических воздействий : пособие / В. Ф. Алексеев, И. Н. Богатко, Г. А. Пискун. – Минск : БГУИР, 2017. – 124 с
5. Моделирование и оптимальное проектирование технических систем : учебно-методическое пособие / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун, В. В. Шаталова. – Минск : БГУИР, 2024. – 99 с.
6. Моделирование отведения тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров воздушного охлаждения=Simulation of Thermal Energy Removal from Processors Using Air Coolers / Г. А. Пискун [и др.] // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 4. – С. 54–62.
7. Алексеев, В. Ф. Методика численного моделирования тепловых процессов в микроэлектронных структурах / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Бозуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 34–37.

UDC 621.396.6:004.94:536.2

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THERMAL SIMULATION IN SEALED AND PERFORATED ENCLOSURES FOR A USB-UART ADAPTER BOARD USING THE SOLIDWORKS SOFTWARE SUITS

Merzlyakov D. P.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Yashchuk V.A. – master's degree student, Assistant Professor, Department of Information and Computer Systems Design

Annotation. This article presents a comparative analysis of thermal simulations performed using SolidWorks (Flow Simulation module) for a USB-UART adapter printed circuit board (PCB) housed in a sealed and perforated enclosure. It examines the formation of heat flows in a closed space and under natural convection through perforations, as well as the influence of the enclosure design parameters on the maximum temperature of the components. Based on the thermal simulation results, recommendations are provided for selecting the enclosure type and boundary conditions for a computational experiment to ensure acceptable thermal performance for the USB-UART adapter PCB.

Keywords: SolidWorks, printed circuit board, engineering modeling, sealed enclosure, perforated enclosure, airflow, thermal management

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ УПРАВЛЯЕМОГО СЕТЕВОГО КОНЦЕНТРАТОРА В ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ SOLIDWORKS И ANSYS

Насанович М.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Алексеев В.Ф. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Экспериментально исследованы методы оценки теплового режима сетевого концентратора с электронными компонентами в программных пакетах *SolidWorks* и *ANSYS*. Установлено, что результаты моделирования теплового режима в программе *SolidWorks* и в программе *ANSYS* различаются. Сделан вывод о необходимости использования каждой из программ для решения определенных инженерных задач в зависимости от входных данных.

Ключевые слова: *SolidWorks*, *ANSYS*, печатная плата, инженерное моделирование, тепловой режим.

Введение. Современные электронные устройства, такие как сетевые концентраторы, требуют высокой надежности при различных нагрузках. Тепловой режим печатных плат определяет, в основном, надежность всего устройства. Ключевым аспектом обеспечения тепловой устойчивости электронного модуля является анализ теплового режима, предотвращающий явление перегрева электронных компонентов [1–10].

В данной статье автором показано, что каждый программный комплекс – *SolidWorks* и *ANSYS* – имеет свои преимущества и недостатки, а также разные подходы к решению инженерных задач, что обеспечивает минимальную погрешность результатов в сравнении друг с другом.

Техническая значимость теплового моделирования печатных плат сетевого оборудования. Управляемые сетевые концентраторы (коммутаторы) относятся к классу ответственных радиоэлектронных средств (РЭС), непрерывно функционирующих в течение длительного времени. Типичный срок службы такого оборудования составляет 5–10 лет при круглосуточном режиме работы. Одним из ключевых факторов, определяющих надежность и безотказность сетевых устройств, является тепловой режим печатной платы, на которой размещены активные компоненты – микроконтроллеры, РНУ-микросхемы, преобразователи питания и память.

Современные тенденции развития сетевого оборудования характеризуются: увеличением плотности монтажа компонентов на печатной плате; повышением тактовых частот и, как следствие, ростом удельной мощности рассеяния; миниатюризацией корпусов, что ограничивает возможности естественного охлаждения; требованием к пассивному охлаждению (без вентиляторов) для обеспечения бесшумной работы в офисных помещениях.

В этих условиях недооценка тепловых нагрузок на этапе проектирования может привести к локальному перегреву компонентов, выходу их за пределы допустимых температурных режимов и, как следствие, к преждевременному отказу устройства. По данным статистики отказов электронных компонентов, повышение температуры на 10 °С сверх допустимого значения сокращает срок службы полупроводниковых приборов в 2–3 раза (эмпирическое правило Аррениуса) [6–10].

Недостатки традиционных подходов к оценке тепловых режимов. Традиционные методы обеспечения тепловых режимов РЭС базируются на: приближенных аналитических расчетах (метод эквивалентной тепловой схемы); натурных испытаниях опытных образцов в

термокамерах; эмпирических рекомендациях, основанных на опыте проектирования аналогичных устройств.

Каждый из этих подходов имеет существенные ограничения. Аналитические расчеты, основанные на сосредоточенных параметрах, не позволяют выявить локальные зоны перегрева на печатной плате и учесть сложную конфигурацию размещения компонентов. Натурные испытания требуют значительных временных и материальных затрат (изготовление опытного образца, проведение измерений), а также не дают возможности оперативно оценить влияние конструктивных изменений на тепловой режим. Кроме того, выявление тепловых проблем на этапе испытаний готового изделия приводит к дорогостоящим доработкам конструкции и затягиванию сроков вывода продукта на рынок.

Преимущества и проблемы компьютерного моделирования тепловых процессов. Системы автоматизированного инженерного анализа (CAE) позволяют перенести оценку тепловых режимов на ранние этапы проектирования, когда внесение конструктивных изменений требует минимальных затрат. Современные программные комплексы, такие как SOLIDWORKS Flow Simulation и ANSYS (включая модули Steady-State Thermal, Iserpak и др.), предоставляют широкие возможности для трехмерного моделирования теплопроводности, конвекции и излучения.

Актуальность сравнительного анализа для управляемого сетевого концентратора. Печатная плата управляемого сетевого концентратора обладает рядом особенностей, делающих ее тепловой анализ особенно важным:

- наличие высокоскоростных интерфейсов Ethernet (Gigabit), требующих применения РНУ-микросхем с повышенным тепловыделением;
- наличие микроконтроллера управления с активной вычислительной нагрузкой;
- компактные габариты корпуса с пассивным охлаждением;
- необходимость обеспечения работоспособности в диапазоне температур 0...40 °С, что является типичным для офисного оборудования.

В открытых источниках отсутствуют систематические исследования, посвященные сравнительному анализу теплового моделирования печатных плат сетевых коммутаторов в различных CAE-средах. Не определены количественные оценки расхождений между результатами, полученными в SOLIDWORKS Flow Simulation и ANSYS, не выявлены факторы, вносящие наибольший вклад в эти расхождения. Отсутствуют рекомендации по выбору программного комплекса для теплового анализа данного класса устройств в зависимости от поставленных задач (оценочный расчет, уточненный анализ, оптимизация).

Основная часть. Сравнительный анализ *SolidWorks* и *ANSYS* в контексте моделирования теплового режима печатных плат выявляет ключевые различия между этими программами при решении инженерных задач. *SolidWorks* выигрывает за счет простоты использования и интуитивного интерфейса для твердотельного моделирования, но уступает в глубине детального инженерного анализа. *ANSYS*, напротив, предлагает высокую точность расчетов, хотя и требует больше времени на освоение из-за менее удобного интерфейса [2, 3].

Для проведения сравнительного анализа было выбрано современное устройство с высокой плотностью элементов на плате (рисунок 1). Первоначально в *SolidWorks* была построена твердотельная геометрическая модель сетевого концентратора, включая все электронные компоненты.

С помощью модуля «Simulation» программного комплекса *SolidWorks* был создан новый проект с типом исследования «Тепло». Для каждого электронного компонента был задан свой материал, как и для печатной платы. Граничными условиями в виде фиксированной геометрии являются крепежные отверстия по углам платы. Создание сетки данной модели позволило завершить настройку проекта и перейти к расчету [4]. Результат моделирования представлен на рисунке 2.

По результатам выполненного моделирования в программе *SolidWorks* максимальная температура печатной платы сетевого концентратора ов с электронными компонентами на ней составила 411 °К.

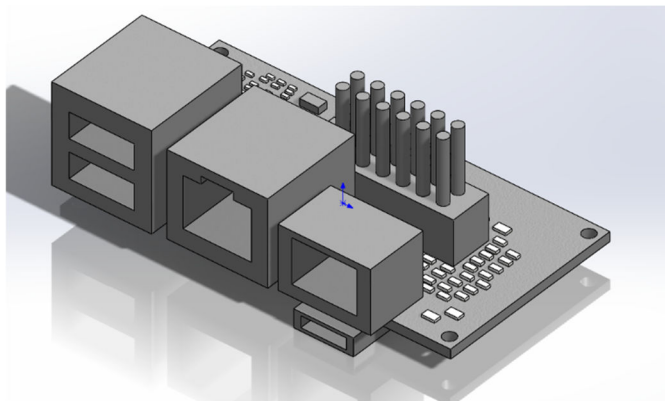


Рисунок 1 – Геометрическая модель платы сетевого концентратора

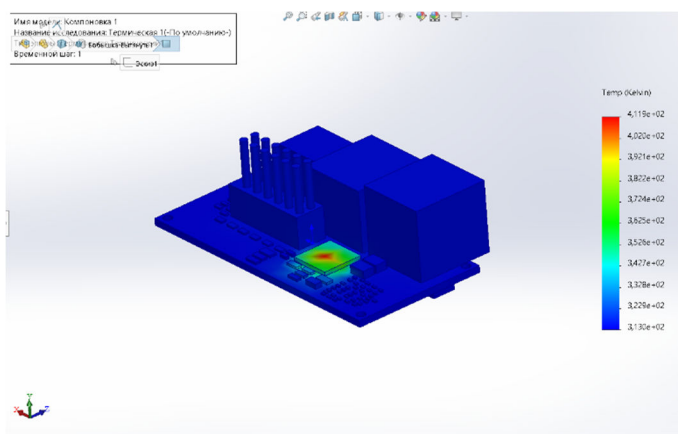


Рисунок 2 – Результат моделирования в программе *SolidWorks*

ANSYS является интегрированной средой моделирования, позволяющей использовать геометрические модели из других популярных *CAD*-систем, таких как, например, *SolidWorks*. Используя уже готовую твердотельную модель печатной платы с электронными компонентами на ней с помощью модуля «*Steady State Thermal*» и типа исследования «*Heat*», был создан новый проект. По аналогии с настройкой моделирования в *SolidWorks* для каждого элемента, включая печатную плату, были заданы материалы и создана сетка. Граничные условия в виде фиксированной геометрии не изменились. Результат моделирования представлен на рисунке 3.

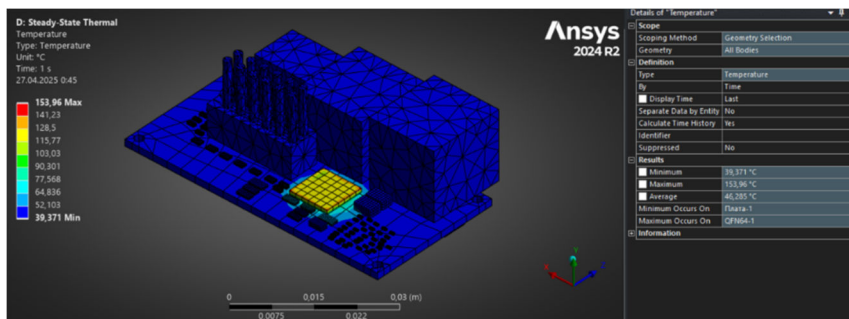


Рисунок 3 – Результат моделирования в программе *ANSYS*

По результатам проведенного моделирования в программе *ANSYS* максимальная температура печатной платы сетевого концентратора с электронными компонентами на ней составила 426 °K.

Заключение. Сравнительный анализ моделирования тепловых режимов печатной платы сетевого концентратора в программных комплексах *SolidWorks* и *ANSYS* показал различия в подходах и результатах.

Различия в математических моделях – разные программные комплексы реализуют различные подходы к решению уравнений теплопереноса (конечно-объемный метод в *SOLIDWORKS Flow Simulation*, конечно-элементный метод в *ANSYS Steady-State Thermal*).

Специфика задания граничных условий – способы учета естественной конвекции, теплообмена излучением и контактных тепловых сопротивлений могут существенно различаться.

Алгоритмы построения сетки – методы дискретизации расчетной области (гексаэдрическая, тетраэдрическая, гибридная сетка) влияют на точность и сходимость решения.

Упрощения геометрии – подходы к моделированию тонких слоев (медная фольга, паяльные соединения) могут различаться, что сказывается на итоговом распределении температур.

Следствием этих различий является вариативность результатов моделирования, полученных в разных программных комплексах для одной и той же конструкции. Без критической оценки сходимости результатов и понимания причин расхождений использование САЕ-средств может привести к принятию неверных конструкторских решений.

SolidWorks обеспечивает простоту использования и интуитивно понятный интерфейс, что делает его удобным для базового проектирования и анализа. *ANSYS*, в свою очередь, предлагает более высокую точность и гибкость в решении сложных инженерных задач, что делает его предпочтительным выбором для детализированного моделирования. Использование *ANSYS* позволило получить более детальные и точные результаты, несмотря на более сложный и настраиваемый интерфейс.

По результатам исследования тепловой режим платы сетевого концентратора с электронными компонентами на ней составила 411 °K в программном комплексе *SolidWorks* и 426 °K – в программном комплексе *COMSOL*. Погрешность результатов друг относительно друга составила 3,5 %.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что *SolidWorks* является программой, предназначенной в первую очередь для твердотельного моделирования, но способной справляться с простыми инженерными задачами наравне с более сложными и специализированными программными продуктами. Примером такого программного продукта может служить *ANSYS*. Эта программа имеет более сложный интерфейс и не предназначена для твердотельного моделирования, однако более оптимизирована для решения инженерных задач любой сложности.

Кроме того, геометрическая модель может быть создана средствами программы *SolidWorks*, а численное моделирование проведено средствами *COMSOL*. Данное решение является наиболее оптимальным для решения инженерных задач любого вида и сложности.

Список литературы

1. Amy, R Reliability analysis of electronic equipment subjected to shock and vibration / R Amy, G Aglietti, G Richardson // *Shock and Vibration*. – 2009. – № 16. – С. 45-59
2. Зиновьев, Д. В. Основы моделирования в *SolidWorks* / Д. В. Зиновьев. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 240 с.
3. Введение в *ANSYS* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://cdn.ANSYS.com/doc/5.4/IntroductionToANSYS.ru_RU.pdf. – Дата доступа: 20.03.2026.
4. Тепловой анализ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://help.solidworks.com/2021/Russian/SolidWorks/cworks/c_Frequency_Analysis.htm – Дата доступа: 27.03.2025.
5. G.A. Dymov, V.P. Belichenko. The main structural element of a reinforced concrete support: mathematical modeling of mechanical vibrations // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021.
6. Рыбаков, Д. Г. Применение метода конечных элементов при анализе физических процессов, протекающих в системе мониторинга окружающей среды в программе *SolidWorks Simulation* / Д. Г. Рыбаков, А. Н. Беликов, В. Ф. Алексеев // *Электронные средства и системы управления : материалы докладов XIX Международной научно-практической конференции, Томск, 15–17 ноября, 2023 г. : в 2 ч. Ч. 1 / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – Томск : В-Спектр, 2023. – С. 132–134.*
7. Алексеев, В. Ф. Математическое моделирование как средство оптимизации параметров силовых интегральных микросхем / В. Ф. Алексеев, А. Д. Сыс, Г. А. Пускун // *Interdisciplinary research: scientific horizons and perspectives : II International Scientific and Theoretical*

Conference, Vilnius, October 1, 2021 / European Scientific Platform. – Vilnius, 2021. – P. 109–113. – DOI : <https://doi.org/10.36074/scientia-01.10.2021>.

8. Алексеев, В. Ф. Моделирование тепловых полей электронных систем в среде ANSYS / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // *BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции*, Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 282–286.

9. Алексеев, В. Ф. Методика численного моделирования тепловых процессов в микроэлектронных структурах / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // *BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции*, Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 34–37.

10. Оптимизация теплового режима приемно-передающего устройства по результатам моделирования тепловых процессов в среде SolidWorks Flow Simulation / Г. А. Пискун [и др.] // *Znanstvena misel journal*. – 2019. – Vol. 1, № 35. – P. 47–60.

UDC 004.94:621.396.6:536.2

COMPARATIVE ANALYSIS OF THERMAL REGIME SIMULATION OF THE PRINTED CIRCUIT BOARD OF A MANAGED NETWORK SWITCH IN SOLIDWORKS AND ANSYS SOFTWARE PACKAGES

Nasanovich M.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alexseev V.F. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. Experimental studies were conducted on methods for evaluating the thermal regime of a network switch with electronic components using the SolidWorks and ANSYS software packages. It was found that the results of thermal regime modeling in SolidWorks and ANSYS differ. A conclusion is drawn about the necessity of using each of the software packages for solving specific engineering problems depending on the input data.

Keywords: SolidWorks, ANSYS, printed circuit board, engineering simulation, thermal regime.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ВЫСОКОСТАБИЛЬНОГО ТЕРМОСТАТИРОВАННОГО ГЕНЕРАТОРА С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Петкевич Д.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Алексеев В.Ф. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Экспериментально проведена оценка методов моделирования тепловых процессов в конструктивных элементах высокостабильного термостатированного генератора с цифровым управлением с использованием программных комплексов SolidWorks и Ansys. В результате моделирования установлено, что значение температуры в рабочей зоне, полученное в среде SolidWorks, составило 395 К, тогда как расчет в Ansys дал значение 383 К. На основе полученных данных обоснована целесообразность применения каждого из программных продуктов для решения конкретных инженерных задач, определяемых характером входных параметров и требуемой точностью анализа.

Ключевые слова: *SolidWorks, ANSYS, печатная плата, инженерное моделирование, тепловые процессы, тепловой режим*

Введение. Обеспечение надёжности современной электронной аппаратуры, в частности высокостабильных термостатированных генераторов с цифровым управлением, невозможно без тщательного анализа тепловых режимов функционирования. Стабильность выходных параметров таких устройств напрямую зависит от равномерности распределения температуры по элементам конструкции и эффективности отвода тепла от критически важных компонентов [1–3].

В представленной работе автором продемонстрировано, что используемые программные комплексы отличаются как методологией расчёта, так и областями применимости, что позволяет добиться высокой сходимости результатов и минимизировать погрешность моделирования тепловых процессов.

Основная часть. Оценка применимости программных комплексов SolidWorks и Ansys при решении задач теплофизического моделирования высокостабильного термостатированного генератора с цифровым управлением позволяет выявить сильные и слабые стороны каждого из инструментов. SolidWorks отличается доступностью освоения и наглядностью построения геометрических моделей, однако его функционал для глубокого теплового анализа уступает специализированным решениям. Ansys, несмотря на более высокий порог входа и сложность настройки, обеспечивает повышенную достоверность расчётов температурных полей и распределения тепловых потоков [1–3].

В качестве объекта исследования выбран высокостабильный термостатированный генератор с цифровым управлением, предъявляющий жёсткие требования к поддержанию температурного режима. На первом этапе в среде SolidWorks построена трёхмерная твёрдотельная модель устройства, включающая печатную плату, элементы термостатирования и электронные компоненты

Для проведения теплофизического анализа в среде SolidWorks задействован модуль теплового моделирования, в рамках которого сформирован вычислительный проект с типом исследования «Термический режим». Материалы присвоены как печатной плате, так и каждому из установленных на ней электронных компонентов, включая элементы системы термостатирования. В качестве граничных условий заданы зоны тепловыделения, соответствующие рабочим режимам активных компонентов, а также условия теплообмена с окружающей средой. Построение конечно-элементной сетки на подготовленной

геометрической модели позволило завершить этап настройки вычислительного эксперимента и приступить к решению задачи.

Результаты вычислительного эксперимента (рисунок 1), выполненного в программном комплексе SolidWorks, показали, что температурное поле в конструкции высокостабильного термостатированного генератора с цифровым управлением характеризуется максимальным значением 395 К в зоне расположения критических компонентов.

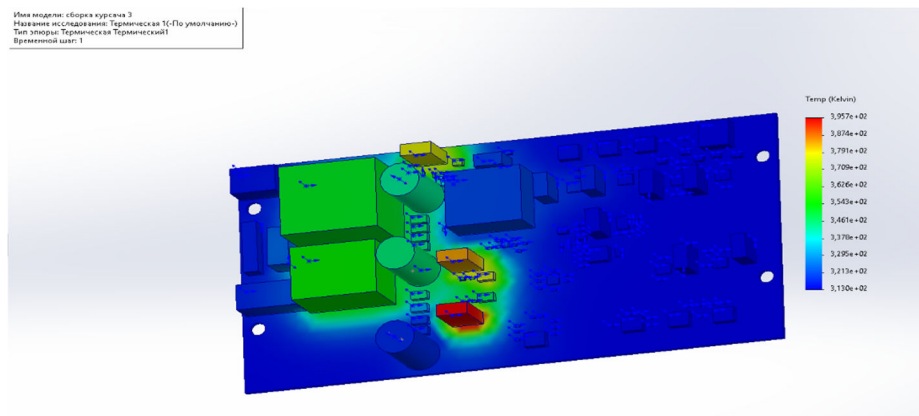


Рисунок 1 – Результат моделирования в программе SolidWorks

Программный комплекс Ansys (приисунок 2) предоставляет возможность импорта геометрических моделей из различных CAD-систем, в том числе из SolidWorks, что обеспечивает непрерывность процесса проектирования. На основе подготовленной трёхмерной модели генератора с элементами термостатирования и электронными компонентами в среде Ansys был развёрнут вычислительный проект с использованием модуля теплового анализа. Аналогично настройке моделирования в SolidWorks для каждого конструктивного элемента, включая печатную плату, назначены теплофизические свойства материалов и построена конечно-элементная сетка. Граничные условия, определяющие источники тепловыделения и условия теплообмена, также сохранили свою конфигурацию.

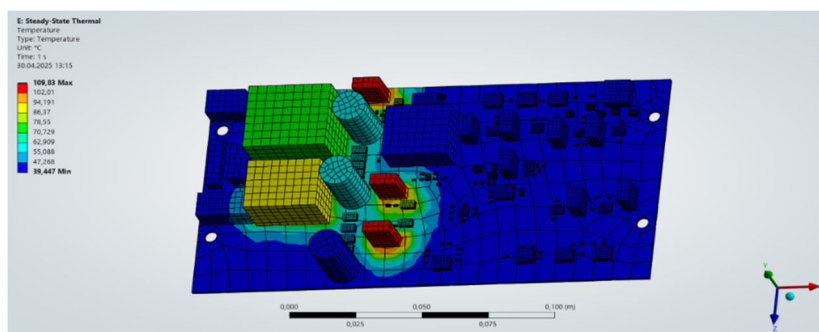


Рисунок 2 – Результат моделирования в программе Ansys

По результатам вычислительного эксперимента, выполненного в программном комплексе Ansys, установлено, что максимальная температура в конструкции высокостабильного термостатированного генератора с цифровым управлением достигла 383 К.

Заключение. Сравнительная оценка моделирования тепловых процессов высокостабильного термостатированного генератора с цифровым управлением в программных средах SolidWorks и Ansys выявила различия как в методологических подходах, так и в получаемых результатах. SolidWorks характеризуется доступностью освоения и наглядностью рабочего процесса, что обуславливает его применимость на этапах предварительного проектирования и экспресс-оценки тепловых режимов. Ansys, в свою очередь, обеспечивает повышенную достоверность расчётов и расширенные возможности

детального теплофизического анализа, что делает его предпочтительным инструментом при решении сложных задач, требующих высокой точности. Применение Ansys позволило получить более детализированную картину распределения температурных полей, несмотря на более высокую сложность настройки вычислительных моделей.

По результатам проведённых исследований установлено, что максимальная температура в рабочей зоне генератора составила 395 К при моделировании в SolidWorks и 383 К – в Ansys. Относительное расхождение результатов составило 3,1%.

На основании изложенного можно заключить, что SolidWorks представляет собой среду, ориентированную преимущественно на твёрдотельное моделирование, однако успешно справляется с решением несложных теплофизических задач наравне со специализированными программными продуктами. Примером такого специализированного решения является Ansys. Данный комплекс отличается более сложным интерфейсом и не предназначен для создания геометрических моделей, однако обладает расширенной функциональностью для решения инженерных задач любой степени сложности в области теплового анализа.

Кроме того, SolidWorks и Ansys могут эффективно применяться в составе комбинированного подхода к инженерному моделированию. Построение геометрической модели целесообразно выполнять средствами SolidWorks, а последующий расчёт тепловых процессов – в среде Ansys. Такое сочетание является наиболее рациональным при решении широкого спектра инженерных задач независимо от их сложности.

Список литературы

1. Алексеев, В. Ф. Методика численного моделирования тепловых процессов в микроэлектронных структурах / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // *BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф.*, Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 34–37.
2. Алексеев, В. Ф. Принципы конструирования и автоматизации проектирования РЭУ: Учеб. пособие / В. Ф. Алексеев – Мн.: БГУИР, 2003. – 197 с.
3. Алексеев, В. Ф. Моделирование тепловых полей электронных систем в среде ANSYS / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // *BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции*, Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2020. – С. 282–286.

UDC 004.94:536.2:621.396.6

COMPARATIVE ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES MODELING OF A PRINTED BOARD OF A HIGH-STABILITY THERMOSTATED DIGITAL CONTROLLED GENERATOR

Petkevich D. V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alexeev V.F. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. The article experimentally evaluates the methods of modeling thermal processes in the structural elements of a highly stable thermostatically controlled digital generator using the SolidWorks and Ansys software packages. The modeling results show that the temperature value in the working area obtained in the SolidWorks environment was 395 K, while the calculation in Ansys yielded a value of 383 K. Based on these findings, the article justifies the suitability of each software product for solving specific engineering problems based on the input parameters and the required analysis accuracy.

Keywords: SolidWorks, ANSYS, Printed Circuit Board (PCB), Engineering Modeling, Thermal processes, Thermal regime

ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭЛЕКТРОННЫЙ МОДУЛЬ ПРОГРАММИРУЕМОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА

Сенько Е.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Алексеев В.Ф. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. В статье представлены результаты сравнительного моделирования механических колебаний (частотного анализа) двусторонней печатной платы программируемого логического контроллера. Исследование проведено для трех вариантов компоновки электронных компонентов с использованием программных комплексов SOLIDWORKS Simulation, Ansys и COMSOL Multiphysics. Выполнен анализ влияния расположения элементов на собственные частоты колебаний платы. Проведена оценка сходимости результатов, полученных в различных CAE-системах, и определен наиболее виброустойчивый вариант компоновки.

Ключевые слова: тепловое моделирование, печатная плата, SOLIDWORKS, Ansys, COMSOL, сравнительный анализ, температура

Введение. Одним из критических факторов, определяющих надежность радиоэлектронных средств (РЭС), является их способность противостоять механическим воздействиям, в частности вибрациям. В процессе эксплуатации, транспортировки или вследствие внешних факторов устройство подвергается динамическим нагрузкам, которые могут привести к резонансным явлениям в конструкции. Возникновение резонанса способно вызвать усталостные разрушения печатных плат, нарушение паяных соединений и, как следствие, полный отказ устройства [1-8].

Особую важность представляет исследование влияния компоновки – расположения электронных компонентов на печатной плате – на ее динамические характеристики. Рациональное размещение элементов может существенно повысить собственную частоту колебаний платы, выводя ее из зоны резонанса с внешними воздействующими частотами.

В данной работе проводится сравнительный анализ результатов частотного моделирования для трех вариантов компоновки печатной платы с использованием трех различных программных комплексов. Целью исследования является оценка сходимости результатов и выбор компоновки, обеспечивающей максимальную виброустойчивость.

Программируемые логические контроллеры (ПЛК) являются основой современных систем промышленной автоматизации, управления технологическими процессами и распределенных систем сбора данных. В условиях цифровой трансформации промышленности требования к надежности и безотказности работы ПЛК существенно возрастают, поскольку выход из строя контроллера может привести к остановке производственного цикла, возникновению аварийных ситуаций и значительным экономическим потерям.

Актуальность исследований. Одним из критических факторов, определяющих долговечность и отказоустойчивость электронных модулей ПЛК, является их способность сохранять работоспособность при воздействии механических нагрузок. В реальных условиях эксплуатации промышленные контроллеры подвергаются широкому спектру механических воздействий: вибрациям, возникающим при работе производственного оборудования; ударным нагрузкам при транспортировке и монтаже; циклическим деформациям, обусловленным термомеханическими процессами. Особую значимость эта проблема приобретает для контроллеров, устанавливаемых на подвижных объектах (транспорт, железнодорожная техника) или в зонах с интенсивной вибрационной нагрузкой.

Традиционные подходы к оценке вибропрочности электронных модулей, основанные на натурных испытаниях, требуют значительных временных и материальных затрат, а также не всегда позволяют выявить критические зоны конструкции на ранних этапах проектирования.

В связи с этим возрастает роль методов компьютерного моделирования, позволяющих на этапе разработки прогнозировать динамическое поведение конструкции, определять собственные частоты колебаний, выявлять зоны концентрации напряжений и оптимизировать конструктивные параметры электронных модулей.

Несмотря на широкое распространение систем автоматизированного инженерного анализа (CAE), вопросы достоверности и сходимости результатов моделирования механических воздействий на электронные модули остаются актуальными. Различные программные комплексы, реализующие конечно-элементный анализ, могут давать отличающиеся результаты в зависимости от применяемых алгоритмов, способов дискретизации расчетной области и моделей поведения материалов. Это требует критической оценки используемых инструментов и разработки методических подходов к моделированию динамических процессов в электронных модулях.

Настоящее исследование направлено на решение задачи частотного анализа электронного модуля программируемого логического контроллера с использованием методов компьютерного моделирования. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения надежности промышленных контроллеров на этапе проектирования, сокращения сроков и стоимости разработки за счет применения современных CAE-средств, а также обоснования выбора программных комплексов для решения задач динамического анализа электронных модулей.

Методика моделирования. Объектом исследования является двусторонняя печатная плата из стеклотекстолита FR-4 с фиксированным набором электронных компонентов, но с тремя различными вариантами их пространственного расположения.

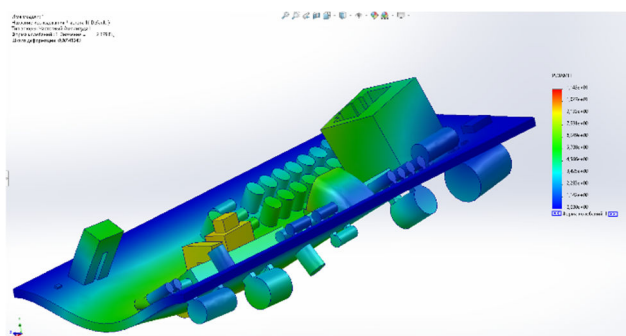
Моделирование проводилось в трех программных комплексах:

- SOLIDWORKS Simulation: модуль частотного анализа, интегрированный в CAD систему SOLIDWORKS, использующий метод конечных элементов для расчета собственных частот и форм колебаний;
- Ansys: расчет в модуле Modal Analysis, реализующем мощные алгоритмы для решения задач динамики конструкций;
- COMSOL Multiphysics: моделирование в модуле Structural Mechanics Module, позволяющее проводить детальный частотный анализ с высокой степенью контроля над сеткой и решателем.

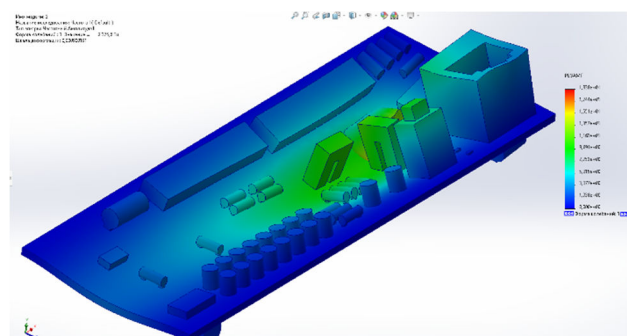
Для всех трех вариантов компоновки были заданы идентичные граничные условия, соответствующие реальным условиям эксплуатации устройства:

- фиксация платы по трем сторонам;
- материал платы и компонентов задан в соответствии с их физическими свойствами;
- сетка конечных элементов строилась с учетом геометрических особенностей моделей для обеспечения сходимости расчетов.

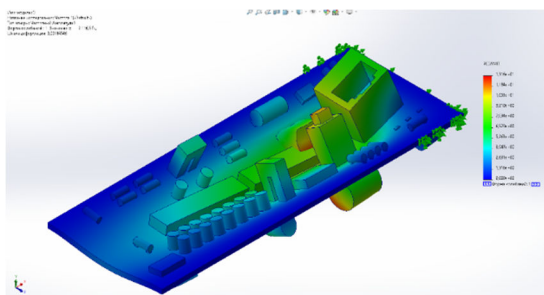
На рисунке 1 представлены трехмерные модели печатной платы для трех исследуемых вариантов компоновки, построенные в среде SOLIDWORKS.



а – первая компоновка



б – вторая компоновка

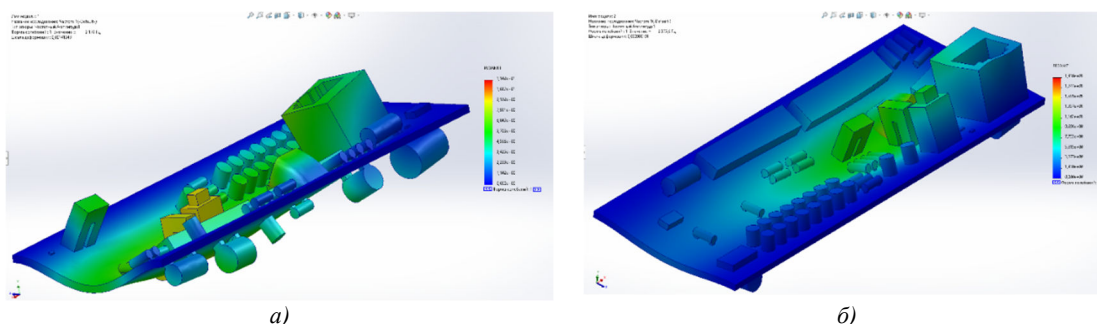


в – третья компоновка

Рисунок 1 – Трехмерные модели печатной платы для трех вариантов компоновки в SolidWorks

Результаты и их обсуждение. В результате моделирования для каждого варианта компоновки и в каждой программной среде были получены значения минимальной собственной частоты колебаний, которая является наиболее критичной с точки зрения возникновения резонанса.

На рисунке 2 показаны примеры визуализации результатов частотного анализа для программных сред Ansys *а)* и COMSOL *б)* соответственно для первой компоновки.



а)

б)

Рисунок 2 – Трехмерные модели печатной платы для первого варианта компоновки в Ansys и COMSOL

Сводные результаты по минимальным собственным частотам для всех вариантов и сред представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение минимальной собственной частоты (Гц) для различных вариантов компоновки и программных сред

Программная среда	Вариант компоновки 1	Вариант компоновки 2	Вариант компоновки 3
SOLIDWORKS	2179	2376	2117
Ansys	2082	2343	2126
COMSOL	2133	2366	2091
Среднее значение	2131	2362	2111

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

1 Влияние компоновки: Наиболее высокая собственная частота (в среднем 2362 Гц) наблюдается для второго варианта компоновки, где крупные элементы разнесены по сторонам платы. Это свидетельствует о том, что данное расположение компонентов обеспечивает наилучшую виброустойчивость конструкции. Первый и третий варианты показывают более низкие значения частот (2131 Гц и 2111 Гц соответственно).

2 Сходимость результатов: Результаты, полученные в трех различных программных комплексах, показывают высокую степень сходимости. Расхождения в значениях минимальной собственной частоты для каждого варианта компоновки не превышают 5%. Это подтверждает корректность построенных моделей и достоверность полученных данных.

3 Соответствие требованиям: Все полученные значения собственных частот (более 2000 Гц) значительно превышают максимальную частоту внешних вибрационных воздействий для данного класса аппаратуры (60 Гц согласно ГОСТ 23752-79 для 2-й группы жесткости). Это гарантирует отсутствие резонансных явлений в рабочем диапазоне и высокую надежность устройства при эксплуатации.

Закключение. Проведенное сравнительное исследование подтвердило, что все рассмотренные CAE-системы (SOLIDWORKS Simulation, Ansys и COMSOL Multiphysics)

являются эффективными инструментами для прогнозирования динамических характеристик печатных плат. Результаты частотного анализа, полученные в трех программных средах, демонстрируют хорошую сходимость.

Установлено, что изменение компоновки электронных компонентов оказывает существенное влияние на собственную частоту колебаний печатной платы. Наиболее виброустойчивым является вариант компоновки с рассредоточенным расположением крупных элементов, обеспечивающий минимальную собственную частоту на уровне 2362 Гц. Все исследуемые варианты компоновки обеспечивают большой запас по частоте по отношению к максимальной частоте внешних вибрационных воздействий, что гарантирует механическую надежность разрабатываемого устройства.

Список литературы

1. Рыбаков, Д. Г. Применение метода конечных элементов при анализе физических процессов, протекающих в системе мониторинга окружающей среды в программе SolidWorks Simulation / Д. Г. Рыбаков, А. Н. Беликов, В. Ф. Алексеев // Электронные средства и системы управления : материалы докладов XIX Международной научно-практической конференции, Томск, 15–17 ноября, 2023 г. : в 2 ч. Ч. 1 / Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – Томск : В-Спектр, 2023. – С. 132–134.
2. Алексеев, В. Ф. Математическое моделирование как средство оптимизации параметров силовых интегральных микросхем / В. Ф. Алексеев, А. Д. Сыс, Г. А. Пискун // Interdisciplinary research: scientific horizons and perspectives : II International Scientific and Theoretical Conference, Vilnius, October 1, 2021 / European Scientific Platform. – Vilnius, 2021. – P. 109–113. – DOI : <https://doi.org/10.36074/scientia-01.10.2021>.
3. Алексеев, В. Ф. Моделирование распределения плотности тока на печатной плате = Simulation of the current density distribution on a PCB / В. Ф. Алексеев, А. П. Горбач, Е. В. Хуторная // Sciences of Europe. – 2020. – Т. 1, № 55. – С. 37–41.
4. Алексеев, В. Ф. Моделирование тепловых полей электронных систем в среде ANSYS / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский, Г. А. Пискун // BIG DATA and Advanced Analytics = BIG DATA и анализ высокого уровня: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Минск, 20–21 мая 2020 г. : в 3 ч. Ч. 3 / Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. А. Богущ [и др.]. – Минск, 2020. – С. 282–286.
5. Адаптеры для программирования микроконтроллеров AVR [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tehnobzor.com/schemes/chips/109-adaptery-dlya-programmirovaniya-mikrokontrollov-avr.html/>.
6. ANSYS Mechanical User's Guide [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ansys.com/documentation>.
7. Алексеев, В. Ф. Алгоритмы иерархического анализа тепловых процессов радиоэлектронных средств / В. Ф. Алексеев, Д. В. Лихачевский // Цифровая среда: технологии и перспективы : сборник материалов II Международной научно-практической конференции, Брест, 31 октября–1 ноября 2024 г. / Брестский государственный технический университет ; редкол.: Н. Н. Шалобыта (гл. ред.) [и др.]. – Брест, 2024. – С. 221–226.
8. Алексеев, В. Ф. Особенности проектирования медицинских электронных устройств = Features of Design of Medical Electronic Devices / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 1. – С. 51–57.

UDC 004.94:621.396.6:534.1

FREQUENCY ANALYSIS OF MECHANICAL IMPACT SIMULATION ON AN ELECTRONIC MODULE OF A PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER

Senko E.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alexeev V.F. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. The article presents the results of comparative modeling of mechanical vibrations (frequency analysis) of a two-sided printed circuit board of a programmable logic controller. The study was conducted for three layout options for electronic components using the software packages SOLIDWORKS Simulation, Ansys and COMSOL Multiphysics. The influence of the arrangement of the elements on the natural oscillation frequencies of the board is analyzed. The convergence of the results obtained in various CAE systems was evaluated, and the most vibration-resistant layout option was determined.

Keywords: thermal modeling, printed circuit board, SOLIDWORKS, Ansys, COMSOL, comparative analysis, temperature

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ МЕТОДОМ РУНГЕ-КУТТЫ 4-ГО ПОРЯДКА

Шибает И. С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Храмович Е. М., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры физики

Аннотация. Рассмотрено движение заряженной частицы в однородных скрещенных электрическом и магнитном полях. Численное решение уравнений Лоренца получено методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Показано, что выбранный шаг интегрирования обеспечивает устойчивое описание винтовой траектории и дрейфа. Приведены таблицы параметров модели и первых шагов интегрирования, а также пример ручного расчета одного шага.

Ключевые слова: заряженная частица, скрещенные поля, уравнение Лоренца, метод Рунге-Кутты, численное моделирование.

Введение. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях лежит в основе работы плазменных устройств, масс-спектрометров, ускорителей и магнитных сепараторов. Даже при простых внешних условиях уравнения движения остаются нелинейными, а аналитическое решение быстро теряет наглядность. По этой причине на практике особенно полезны устойчивые и достаточно точные пошаговые методы интегрирования, среди которых метод Рунге-Кутты 4-го порядка занимает удачное промежуточное положение между точностью и вычислительной стоимостью [1, 2].

Физическая постановка задачи. Рассматривается частица с зарядом q и массой m в однородных полях $E = (800, 0, 0)$ В/м и $B = (0, 0,03/\sqrt{2}, 0,03/\sqrt{2})$ Тл. Поля взаимно перпендикулярны, поэтому траектория приобретает трехмерный характер. В качестве частицы выбран электрон: $q = -1,602 \times 10^{-19}$ Кл, $m = 9,109 \times 10^{-31}$ кг. Начальные условия заданы как $r_0 = (0, 0, 0)$ м и $v_0 = (4,0; 1,0; 1,0) \times 10^6$ м/с. Такой набор параметров дает наглядную траекторию на наносекундном интервале и позволяет оценить влияние поперечного дрейфа на движение в поле [3].

$$\begin{aligned} m \cdot dv/dt &= q(E + v \times B) \\ dr/dt &= v \end{aligned}$$

Здесь правая часть определяется мгновенной скоростью, поэтому задача относится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Для такой системы особенно важна не только локальная точность, но и отсутствие накопления заметного фазового сдвига на нескольких десятках периодов гиродвижения.

Численный метод и алгоритм. Переход к методу Рунге-Кутты 4-го порядка удобнее описывать как последовательность из четырех оценок. На первом этапе используются текущие координаты и скорость. На втором и третьем этапах состояние уточняется в середине шага, а на четвертом – в его конце. В результате каждый шаг строится как взвешенное среднее четырех наклонов с весами 1:2:2:1. Такая схема особенно уместна здесь, поскольку в уравнении Лоренца ускорение зависит не только от координат, но и от скорости, а значит промежуточные точки должны обновляться согласованно.

При шаге $h = 5 \times 10^{-12}$ с из начального состояния получается ускорение $a_0 = (q/m)(E + v_0 \times B) \approx (-1,41 \times 10^{14}; 1,49 \times 10^{16}; -1,49 \times 10^{16})$ м/с². Если разложить первый шаг по

стадиям RK4, то уже на начальном подшаге скорость вдоль x уменьшается, а поперечные компоненты начинают поворачиваться в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. После первого шага получаем $v_1 \approx (2,00 \times 10^{-5}; 5,19 \times 10^{-6}; 4,81 \times 10^{-6})$ м и $v_1 \approx (3,998 \times 10^6; 1,075 \times 10^6; 0,925 \times 10^6)$ м/с. Эти числа служат не только проверкой кода, но и ориентиром: ошибка округления на таком шаге остается намного меньше самого физического изменения за шаг. Параметрв модели представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры модели

Параметр	Значение
Заряд частицы q	$-1,602 \times 10^{-19}$ Кл
Масса частицы m	$9,109 \times 10^{-31}$ кг
Электрическое поле E	$(800, 0, 0)$ В/м
Магнитное поле B	$(0, 0,03/\sqrt{2}, 0,03/\sqrt{2})$ Тл
Начальная скорость v_0	$(4,0; 1,0; 1,0) \times 10^6$ м/с
Начальная координата r_0	$(0, 0, 0)$ м
Шаг интегрирования h	5×10^{-12} с
Интервал расчета	20 нс

Таблица 1 показывает расчетные условия, при которых траектория сохраняет видимую трехмерную структуру без чрезмерного роста координат на коротком временном промежутке.

На рисунке 1 видна винтовая траектория с дрейфом в направлении электрического поля. Проекция на координатные плоскости подтверждают, что поперечные колебания связаны с магнитной составляющей, а медленный рост координат вдоль направления результирующего переноса определяется электрическим полем.

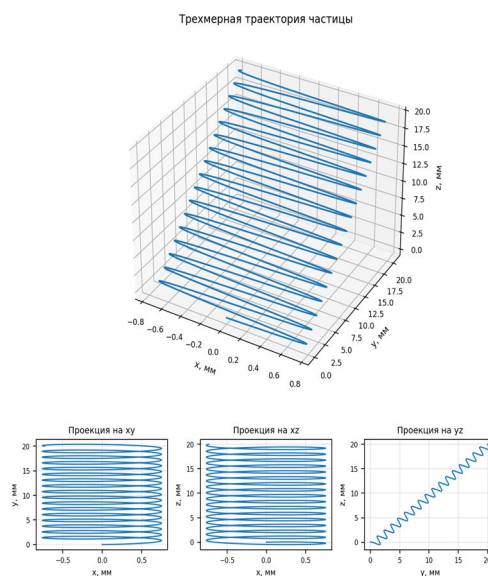


Рисунок 1 - Траектория заряженной частицы в скрещенных полях

Первые шаги интегрирования. Для выбранных параметров характерный циклотронный период составляет примерно 1,19 нс, тогда как шаг интегрирования равен 5 пс. На один период приходится порядка 240 шагов, поэтому дискретизация достаточно плотная, чтобы не исказить фазу вращения. Оценка дрейфовой скорости E/B дает величину порядка $2,7 \times 10^4$ м/с; именно такой медленный перенос и проявляется как плавный рост координат на фоне быстрых поперечных колебаний. Тем самым численные таблицы согласуются с физической картиной движения в скрещенных полях.

Метод Рунге-Кутты 4-го порядка дает устойчивое и наглядное описание движения заряженной частицы в скрещенных полях при разумном выборе шага интегрирования. На

рассматриваемом интервале видно сочетание поперечных колебаний, вызванных магнитным полем, и направленного переноса, обусловленного электрическим полем. Для учебной и прикладной постановки такой подход удобен тем, что сохраняет физическую интерпретацию траектории и не требует сложной численной инфраструктуры.

При более сильных полях или большем времени моделирования полезно дополнительно контролировать локальную погрешность, например сравнением решений на двух шагах или использованием адаптивного шага. Для учебной постановки выбранная схема уже достаточна: она показывает влияние полей разной природы и дает результаты, которые легко проверить по первым шагам интегрирования. Координаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Координаты

n	t, пс	x, мм	y, мм	z, мм	vx, км/с	vy, км/с	vz, км/с
0	0	0.000000	0.000000	0.000000	4000.000	1000.000	1000.000
1	5	0.019996	0.005187	0.004813	3997.905	1074.605	925.395
2	10	0.039974	0.010746	0.009254	3993.027	1149.145	850.855
3	15	0.059922	0.016678	0.013322	3985.370	1223.569	776.431
4	20	0.079823	0.022981	0.017019	3974.939	1297.823	702.177
5	25	0.099666	0.029656	0.020344	3961.742	1371.857	628.143

По данным таблицы 2 координаты растут плавно, а поперечные компоненты скорости меняются взаимосвязанно. Это согласуется с действием силы Лоренца: магнитное поле разворачивает вектор скорости, а электрическое поле сообщает частице направленный перенос.

Ссылки на литературу

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория поля. 8-е изд., стер. М.: Физматлит, 2004. 536 с.
2. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.
3. Вержбицкий В. М. Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002. 840 с.
4. Hairer E., Nørsett S. P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations I: Nonstiff Problems. 2nd ed. Berlin: Springer, 1993. 528 p.
5. Runge-Kutta method [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mathworld.wolfram.com/Runge-KuttaMethod.html>. Дата доступа: 22.03.2026.

Примечание. Для построения графиков использован код на Python, приведённый в отдельном файле. Полный архив с программой доступен по запросу. Верификация на первых шагах подтверждает согласование численных значений с ожидаемой физической картиной.

UDC 004.42:378

MODELING OF A CHARGED PARTICLE MOTION IN CROSSED ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS BY THE 4TH-ORDER RUNGE-KUTTA METHOD

Shibaev I.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Khramovich E. M., – Cand. of Phys. and Math. Sci., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics

Annotation. The motion of a charged particle in uniform crossed electric and magnetic fields is studied. The Lorentz equations are solved numerically by the fourth-order Runge-Kutta method. The selected step size reproduces the spiral drift trajectory with sufficient accuracy. Tables of model parameters and the first integration steps are presented together with a hand-calculated example.

Keywords: charged particle, crossed fields, Lorentz equation, Runge-Kutta method, numerical simulation.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Зубарь Д.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Алексеев В.Ф. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Рассмотрены критические факторы, влияющие на точность измерительной аппаратуры на этапе проектирования печатных плат. Обоснованы конструкторско-технологические методы обеспечения помехоустойчивости: многослойная структура, разделение аналоговых и цифровых цепей заземления, экранирование высокоимпедансных цепей. На примере разрабатываемого узла (наименование узла) показаны результаты моделирования целостности сигнала и пульсаций питания. Предложенные решения позволяют минимизировать влияние паразитных параметров на метрологические характеристики устройства.

Ключевые слова: печатная плата, измерительная аппаратура, помехоустойчивость, разводка заземления, целостность сигнала, ЭМС.

Введение. Современная измерительная аппаратура предъявляет высокие требования к точности, стабильности и помехозащищенности. В условиях миниатюризации и повышения быстродействия электронных компонентов качество проектирования печатной платы (ПП) становится определяющим фактором, влияющим на метрологические характеристики устройства. Ошибки топологии, некорректная разводка цепей питания и заземления могут свести на нет преимущества даже самой прецизионной элементной базы.

Особую сложность представляют устройства смешанного типа, содержащие одновременно высокочувствительные аналоговые цепи и высокоскоростные цифровые интерфейсы. Паразитные наводки, «земляные петли» и синфазные помехи являются основными источниками погрешностей, что делает актуальной задачу разработки эффективных методов проектирования ПП для измерительной аппаратуры.

В данной статье обобщены особенности топологического проектирования, реализованные в рамках дипломного проекта «(название вашего устройства)», и показана их эффективность на основе результатов моделирования.

Основная часть. При проектировании ПП для измерительной аппаратуры необходимо учитывать три группы критических факторов, влияющих на точность измерений: паразитные параметры топологии, помехи по цепям питания и заземления, а также электромагнитную совместимость.

Паразитные емкости и индуктивности проводников приводят к искажению формы сигнала, особенно в высокочастотном диапазоне. Наибольшую опасность представляют длинные параллельные дорожки, создающие взаимные наводки. В высокоимпедансных измерительных цепях (входы операционных усилителей, источники опорного напряжения) даже незначительные токи утечки через паразитные емкости могут вызывать смещение нуля и снижение точности.

Проблема «земляной петли» возникает при наличии нескольких путей протекания обратного тока. Импеданс общего провода не равен нулю, и токи цифровых цепей, протекая по участкам аналоговой земли, создают падение напряжения, которое воспринимается аналоговыми узлами как полезный сигнал. Это особенно критично для аналого-цифровых преобразователей с высокой разрядностью (16–24 бит), где допустимый уровень шума составляет десятки микровольт.

Для решения перечисленных проблем может быть применен комплекс конструкторско-технологических решений, реализованных в САПР *Altium Designer*.

На этапе подбора комплектующих при проектировании печатных плат измерительной аппаратуры важно учитывать особенности компонентов для *SMD* монтажа. С точки зрения электромагнитной совместимости такие компоненты более предпочтительны для высокоточной, высокочастотной и измерительной техники. Так как имеют ряд преимуществ над компонентами сквозного монтажа. Сравнение способов монтажа приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение способов монтажа компонентов ПП

Характеристика	Поверхностный монтаж	Выводной монтаж
Паразитная индуктивность	Низкая	Высокая
Площадь контура тока	Маленькая	Большая
Излучение помех	Низкое	Высокое
Чувствительность к ЭМП	Низкая	Высокая

Как видно из таблицы, для компонентов измерительного блока устройства предпочтительно использовать компоненты для поверхностного монтажа.

Разделение зон. На рисунке 1 представлен фрагмент топологии печатной платы измерителя. Измерительный блок отнесен от других узлов печатной платы для минимизации помех. Монтаж измерительных цепей выполнен тонкими проводниками чтобы уменьшить влияние антенного эффекта на входы АЦП. Так как плата является двухсторонней, то с обратной стороны тоже размещены элементы. Для размещения был выбран корпус держателя батареи. Этот компонент не вносит никаких помех в работу устройств, расположенных поблизости. Резисторы расположены максимально близко к выводам микросхемы с целью снижения паразитной индуктивности.

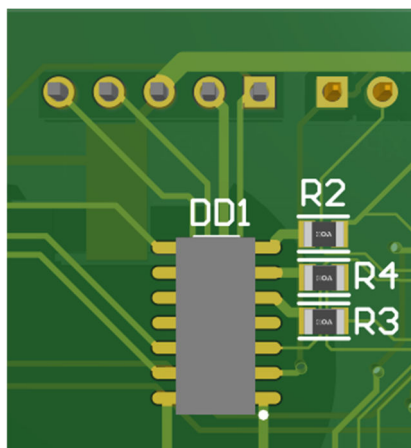


Рисунок 1 – Измерительный блок устройства

Таким образом, предложенные конструкторско-технологические решения позволяют системно подойти к вопросам обеспечения помехоустойчивости измерительного устройства на этапе проектирования печатной платы. Выбор *SMD*-компонентов, топологическое разделение функциональных узлов и оптимизация геометрии проводников создают необходимые условия для минимизации влияния паразитных параметров и электромагнитных помех на точность измерений.

Закключение. В результате выполнения работы выполнен анализ критических факторов, влияющих на точность измерительной аппаратуры на этапе проектирования печатной платы. Установлено, что основными источниками погрешностей являются паразитные параметры топологии (емкости и индуктивности проводников), помехи по цепям питания и заземления, а также эффект «земляной петли». Показано, что применение компонентов поверхностного монтажа обладает преимуществами перед выводными аналогами с точки зрения электромагнитной совместимости за счет меньшей паразитной индуктивности и сокращенной площади контура тока.

На основе проведенного анализа предложен и реализован комплекс конструкторско-технологических решений, включающий топологическое разделение измерительного блока, монтаж чувствительных цепей тонкими проводниками для снижения антенного эффекта, а также минимизацию длины соединений резисторов для уменьшения паразитной индуктивности. Разработанная топология печатной платы с учетом особенностей двухстороннего монтажа и выбора корпуса держателя батареи, не вносящего дополнительных помех, позволяет снизить уровень паразитных влияний и обеспечить достоверность результатов измерений. Предложенные решения могут быть рекомендованы к применению при проектировании измерительных модулей смешанного типа.

Список литературы

1. *The Impact of ESD on Microcontrollers* / Gennady A. Piskun, Viktor F. Alexeev, Sergey M. Avakov, Vladimir E. Matyushkov, Dmitry S. Titko ; Edited by PhD, Associate professor Viktor F. Alexeev. – Minsk : Kolograd, 2018. – 184 p. – ISBN 978-9857-148-40-0.
2. Alexseev, V. Approaches to the optimization of the electronic module using the research of transformation of energy of mechanical exposure / Viktor F. Alexseev, Gennady A. Piskun, Dmitriy V. Likhachevsky // *Slovak international scientific journal*. – 2018. – Vol. 1, N 14. – Pp. 9–27.
3. Алексеев, В.Ф. Impact of discharges of static electricity on semiconductor structures and integral schemes / В.Ф. Алексеев, Г.А. Пискун, А.А. Луковский // *Danish Scientific Journal*. – 2018. – Vol.1, N 19. – Pp. 31–41.
4. Models for predicting the reliability of integral schemes taking into account the impact of electrostatic discharge / В.Ф. Алексеев [и др.] // *Slovak international scientific journal*. – 2018. – Vol. 1, N 24. – Pp. 47–62.

UDC 621.3.049.77–048.24:537.2

CONTROL OF MICROCONTROLLER UNDER THE INFLUENCE OF ELECTROSTATIC DISCHARGE

Zubar D.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alekseev V.F. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. The critical factors affecting the accuracy of measuring equipment at the stage of printed circuit board design are considered. Design and technological methods for ensuring noise immunity are substantiated: multilayer structure, separation of analog and digital grounding circuits, shielding of high-impedance circuits. Using the example of the developed unit (unit name), the results of signal integrity and power ripple simulation are shown. The proposed solutions minimize the influence of parasitic parameters on the metrological characteristics of the device.

Keywords: printed circuit board, measuring equipment, noise immunity, grounding routing, signal integrity, EMC.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В СИСТЕМАХ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Ефремова А.Ю.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Алефиренко В.М. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. Одним из наиболее перспективных решений для защиты информации является шифрование с помощью квантовых точек. В данной статье рассматривается возможность использования численных методов моделирования для прогнозирования поведения спектров квантовых точек. Основное внимание уделяется решению двумерного стационарного уравнения Шредингера методом конечных элементов с использованием эрмитовых функций. Результатом решения данного уравнения являются энергетические уровни, позволяющие предсказать спектры поглощения, что важно для оптимизации параметров квантового шифрования и повышения его устойчивости к внешним воздействиям.

Ключевые слова: квантовое шифрование, квантовые точки, спектры поглощения, методы численного моделирования, уравнение Шредингера.

Введение. В последние десятилетия наблюдается стремительное развитие технологий, связанных с обработкой и защитой данных. В условиях постоянного роста объемов информации и увеличения числа киберугроз, вопросы безопасности данных становятся особенно актуальными. Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является использование квантовых технологий, в частности, квантовых точек, для шифрования данных. Квантовые точки, будучи наноразмерными полупроводниковыми структурами, обладают уникальными оптическими и электронными свойствами. Благодаря этим свойствам они успешно применяются в квантовой криптографии. Численное моделирование физических процессов, связанных с квантовыми точками, играет ключевую роль в понимании их поведения и взаимодействия с окружающей средой. С помощью современных вычислительных методов и алгоритмов можно проводить детальный анализ свойств квантовых точек, что позволяет оптимизировать их использование в системах шифрования [1–3].

Основная часть. Квантовое шифрование – это метод защиты информации, основанный на использовании квантовых битов для передачи информации, что обеспечивает высокий уровень безопасности. Этот вид шифрования использует квантовую механику для выполнения криптографических задач, которые повышают безопасность передаваемых данных. В отличие от традиционных методов шифрования, таких как *AES* и *RSA*, которые опираются на сложные математические вычисления, квантовое шифрование использует физические свойства квантовых битов (кубитов) для защиты данных, делая их более сложными для взломов.

Квантовые точки – это наноразмерные полупроводниковые кристаллы, которые обладают уникальными оптическими и электронными свойствами благодаря квантовым эффектам.

Спектры поглощения квантовых точек зависят от их размера, формы и материала, из которого они изготовлены. Эти спектры могут быть использованы для шифрования информации, так как они представляют собой уникальные «отпечатки» для каждой квантовой точки. При передаче информации через квантовые точки можно манипулировать их спектрами поглощения, изменяя параметры, такие как размер или состав, что позволяет создавать различные состояния, которые могут быть использованы для шифрования данных.

При использовании спектров поглощения в квантовом шифровании информация может быть закодирована в виде различных уровней энергии, которые соответствуют различным состояниям квантовых точек.

При этом, благодаря квантовым эффектам, любое вмешательство в систему, например, попытка перехвата информации, приведет к изменению состояния квантовых точек, что будет немедленно замечено. Это свойство обеспечивает высокий уровень безопасности, так как злоумышленник не сможет получить доступ к закодированной информации без ее изменения.

Кроме того, использование квантовых точек в шифровании позволяет интегрировать эту технологию в существующие оптические системы связи, что делает ее более практичной для применения в реальных условиях. Квантовые точки могут быть использованы в качестве источников фотонов, которые передают информацию на большие расстояния, обеспечивая при этом защиту от перехвата [1].

В рамках шифрования с помощью квантовых точек, можно использовать различные численные и математические методы, а также численные модели физических процессов для прогнозирования параметров шифрования и его качества.

Численные методы – это набор алгоритмов, используемых для решения математических задач, которые не могут быть решены аналитически или требуют значительных вычислительных ресурсов.

Численные методы, такие как метод Монте-Карло, могут быть использованы для моделирования статистических свойств квантовых точек, включая распределение энергии и вероятности переходов между энергетическими уровнями. Среди подобных методов можно выделить метод функционала плотности, который позволяет исследовать электронные структуры квантовых точек с высокой точностью, демонстрируя, как электронные состояния изменяются в зависимости от размера и формы квантовой точки, что, в свою очередь, влияет на ее оптические свойства.

В результате применения численных методов исследователи могут не только предсказывать спектры поглощения, но и оптимизировать параметры квантовых точек для достижения желаемых свойств.

Математические методы – это совокупность подходов, используемых для решения математических задач и анализа различных явлений.

Численные модели физических процессов – это более сложные математические модели, которые используют численные методы для решения физических уравнений и описания различных явлений в природе. Эти модели позволяют исследовать сложные системы, для которых аналитическое решение невозможно или крайне затруднительно [2].

Численные модели физических процессов позволяют использовать методы Монте-Карло для моделирования случайных процессов и оценки вероятностей различных исходов в системах с квантовыми точками, использовать решение уравнений Максвелла для анализа взаимодействия света с квантовыми точками, а также провести симуляцию на основе конечных элементов для моделирования распределения электромагнитных полей вблизи квантовых точек.

Все эти методы и модели могут быть использованы для разработки и анализа методов шифрования, основанных на спектрах поглощения квантовых точек, а также для оценки их эффективности и безопасности. Однако в данной статье подробно будет рассмотрено предсказание поведения квантовых точек и их спектров поглощения с помощью решения уравнения Шредингера [2,3].

Уравнение Шредингера – это основное уравнение нерелятивистской квантовой механики, описывающее динамику частиц. Состояние классической частицы в любой момент времени описывается заданием ее координат и импульсов (x, y, z, p_x, p_y, p_z) . Зная эти величины в момент времени t , можно определить эволюцию системы под действием известных сил во все последующие моменты времени. В квантовой физике состояние системы описывается волновой функцией $\psi(x, y, z, t)$.

Предсказание поведения квантовых точек сводится к решению стационарного уравнения Шредингера.

Однако важно понимать, что, поскольку аналитическое решение уравнения Шредингера для сложных систем часто невозможно, необходимо использовать численные методы, такие как метод конечных разностей, метод конечных элементов или метод матричной диагонализации.

Решив уравнение Шредингера, можно получить энергетические уровни электронов в квантовой точке. Энергетические уровни могут быть использованы для предсказания спектров поглощения квантовых точек. Когда квантовая точка поглощает фотон, она может перейти с одного энергетического уровня на другой. Спектр поглощения будет зависеть от разности энергий между уровнями, что можно вычислить с помощью уравнения Шредингера.

Стационарное двумерное уравнение Шредингера, записанное под формулой 1, является теоретической основой для описания квантовых систем, многие из которых исследуются численными методами [4,5]

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{d^2 \Psi}{dx^2} + \frac{d^2 \Psi}{dy^2} \right) + U(x, y) \cdot \Psi(x, y) = E \Psi(\vec{r}), -\infty < x < \infty, -\infty < y < \infty. \quad (1)$$

где $\hbar$ – постоянная Планка;

m – масса частицы;

$d^2 \Psi / dx^2, d^2 \Psi / dy^2$ – производные второго порядка волновой функции по координатам x, y соответственно;

$U(x, y)$ – потенциальная энергия частиц в данном пространстве пространства;

E – энергия состояния частицы;

r – радиус частицы.

В данном случае для решения уравнения будет использоваться метод конечных элементов. Этот метод можно использовать для нахождения энергетического спектра связанных состояний [3].

В подавляющем большинстве работ применяются конечные элементы, функции формы которых являются интерполяционными полиномами Лагранжа определенного порядка. При этом обеспечивается непрерывность функции численного решения, однако частные производные решения не являются непрерывными. Известен и другой тип конечных элементов, функции формы которых строятся на основе интерполяционных полиномов Эрмита [4]. Их применение приводит к непрерывности первой, а при необходимости, второй и более старших производных в численном решении.

В данном случае будет использоваться второй тип конечных элементов.

Численные решение задачи реализуется в конечной области $x_{min} < x < x_{max}, y_{min} < y < y_{max}$, размеры которой выбираются достаточно большими, чтобы не влиять на вычисляемые собственные значения, так что граничные условия принимают вид

$$\Psi(x_{min}, y) = 0; \Psi(x_{max}, y) = 0; \Psi(x, y_{min}) = 0; \Psi(x, y_{max}) = 0. \quad (2)$$

Для аппроксимации численного решения уравнения используется прямоугольные конечные элементы, функции формы которых получаются в виде произведения одномерных функций формы по каждой независимой переменной. В локальных координатах $-1 < \alpha < 1, -1 < \beta < 1$

$$\varphi_{i,j}(\alpha, \beta) = \varphi_i(\alpha) \cdot \varphi_j(\beta). \quad (3)$$

где $\varphi_{i,j}(\alpha, \beta)$ – двумерная функция;

$\varphi_i(\alpha), \varphi_j(\beta)$ – одномерные функции, зависящие от α и β соответственно.

Причем одномерные функции формы являются полиномами, коэффициенты которых обеспечивают выполнение непрерывности функции и ее производной в узлах. В одномерном случае при выборе U узлов на каждом элементе это означает, что искомую функцию можно представить в виде

$$f(\alpha) = \sum_{k=1}^U (f_k \varphi_k(\alpha) + f'_{U+k} \varphi_{U+k}(\alpha)). \quad (4)$$

где $f(\alpha)$ – аппроксимируемая функция.

f_k – коэффициент разложения функции $\varphi_k(\alpha)$

f'_{U+k} – коэффициент разложения функции $\varphi_{U+k}(\alpha)$

$\varphi_k(\alpha)$ – эрмитовы базисные функции.

$\varphi_{U+k}(\alpha)$ – дополнительные базисные функции.

При этом эрмитовы базисные функции должны удовлетворять следующим условиям интерполяции

$$\varphi_k(\alpha_l) = \delta_{kl}; \quad \frac{d\varphi_{U+k}}{d\alpha} \big|_{\alpha_l} = \delta_{kl}; \quad k, l = 1 \dots U. \quad (5)$$

где $\varphi_k(\alpha_l)$ – значение k -й базисной функции в узле α_l ;

$d\varphi_{U+k}(\alpha)/d\alpha$ – производная функции φ_{U+k} по α , взятая в точке α_l ;

δ_{kl} – символ Кронекера: $\delta_{kl} = \begin{cases} 1, & \text{если } k=l \\ 0, & \text{если } k \neq l \end{cases}$.

При этом базисные функции являются полиномами порядка $P=2U-1$.

Далее представим численное решение уравнения (1) в виде суперпозиции функций формы конечных элементов в глобальных координатах

$$\Psi(x, y) = \sum_a \Psi_a \varphi_a(x, y), \quad (6)$$

где a – глобальный номер узла в двумерной области.

Для получения системы расчетных соотношений необходимо подставить выражение (6) для искомой волновой функции в уравнение (1). После выполнения стандартного умножения на весовые (они же – базисные) функции (3) и перехода к слабой формулировке метода взвешенных невязок можно получить задачу, обобщенную на собственные значения

$$A \Psi = \varepsilon B \Psi. \quad (7)$$

При этом матрицы A, B вычисляются суммированием отдельных конечно-элементных матриц

$$A = \sum_{e=1}^E A^{(e)}; \quad B = \sum_{e=1}^E B^{(e)}. \quad (8)$$

Элементы матриц вычисляются по формулам (9) и (10).

$$A_{i,j}^{(e)} = \frac{\hbar^2}{2m} \iint_{(e)} \frac{d\varphi_i}{dx} \cdot \frac{d\varphi_j}{dx} dx dy + \frac{\hbar^2}{2m} \iint_{(e)} \frac{d\varphi_i}{dy} \cdot \frac{d\varphi_j}{dy} dx dy + \iint_{(e)} \varphi_i \varphi_j U(x, y) dx dy. \quad (9)$$

$$B_{i,j}^{(e)} = \iint_{(e)} \varphi_i \varphi_j dx dy. \quad (10)$$

Учет граничных условий реализуется присвоением узловым значениям заданных значений и исключением строк и столбцов с соответствующими номерами из разреженных матриц А и В, определяющих обобщенную задачу на собственные значения.

Решение задачи (7) позволяет получить собственные значения энергии ε_n и соответствующие собственные векторы $\Psi_a^{(n)}$, содержащие значения функции и ее частных производных в узлах прямоугольной сетки [4,5].

Заключение. Численное моделирование физических процессов является важным методом для исследования квантовых точек и их спектров. С помощью современных вычислительных методов можно понять взаимодействия между квантовыми точками и окружающей средой, что, в свою очередь, способствует оптимизации их использования в шифровании. Моделирование позволяет предсказывать поведение квантовых систем, что является важным шагом для разработки новых технологий и улучшения существующих.

Список литературы

1. Алефиренко В.М., Ефремова А.Ю., Асценко А.М. (2024) Анализ современных подходов к классификации методов шифрования. *SCIENCE TIME* (12), 45–50.
2. Зенков, А. В. Численные методы : учеб. пособие / А. В. Зенков. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 124 с.
3. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1977.
4. Shertzer J., Botero J. Finite-element analysis of electron-hydrogen scattering // *Phys.Rev.* 49A (1994) 3673-3679.
5. Pask J.E. Finite-element methods in electronic-structure theory // *Computer Physics Communications* 135 (2001) 1–34.

UDC 004.056.53–517.956.227

APPLICATION OF NUMERICAL MODELING METHODS FOR PREDICTING THE BEHAVIOR OF QUANTUM DOTS IN INFORMATION SECURITY SYSTEMS.

Yafremava A.Y.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alefirenko V.M. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. One of the most promising solutions for information security is encryption using quantum dots. This work explores the possibility of applying numerical modeling methods to predict the behavior of quantum dot absorption spectra. The focus is on solving the two-dimensional stationary Schrödinger equation using the finite element method with Hermite basis functions. The solution of this equation yields energy levels that allow for the prediction of absorption spectra, which is essential for optimizing quantum encryption parameters and enhancing its resistance to external influences.

Keywords: quantum encryption, quantum dots, absorption spectra, numerical modeling methods, Schrödinger equation.

**СЕКЦИЯ
«ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ»**

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ДЫХАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Лужинский А.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Ревинская И.И. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. В работе рассмотрена разработка программного комплекса для бесконтактной оценки параметров внешнего дыхания по видеозаписи пациента. Предлагаемый подход сочетает алгоритмы компьютерного зрения, автоматическую калибровку измерений и модуль аналитической обработки временных рядов. Система выполняет выделение контура тела, детекцию и трекинг маркеров, перевод пиксельных расстояний в миллиметры, расчет дыхательных циклов и сохранение результатов в базе данных. Практическая значимость разработки состоит в возможности применения для скрининга, динамического наблюдения и цифрового сопровождения пульмонологических пациентов.

Ключевые слова: внешнее дыхание, бесконтактная диагностика, компьютерное зрение, спирометрия, видеоанализ, трекинг маркеров, K-means, медицинские данные.

Введение. Современная пульмонология нуждается в инструментах, которые позволяют получать количественную информацию о дыхательной функции без контакта с пациентом. Классическая спирометрия остается клиническим стандартом, однако она требует специального оборудования, непосредственного взаимодействия с обследуемым и не всегда удобна для массового скрининга. На этом фоне растет интерес к методам, в которых параметры дыхания извлекаются из видеопотока [1]. Такой подход делает исследование менее инвазивным, упрощает организацию наблюдения и позволяет использовать стандартные камеры. Задача работы заключается в создании программного комплекса, который по видеозаписи определяет динамику дыхательных движений и формирует набор показателей, пригодных для дальнейшей интерпретации медицинским специалистом.

Разработанная система построена по модульному принципу. Центральным координатором обработки выступает модуль `video_processor.py`, который управляет загрузкой видео, последовательным вызовом алгоритмов и формированием итогового отчета. Такое разделение логики позволило выделить независимые компоненты для сегментации, детекции маркеров, калибровки, анализа дыхательных параметров и хранения данных. Модульная архитектура упрощает сопровождение, дает возможность быстро менять отдельные алгоритмы и делает систему пригодной как для интерактивного режима с визуализацией, так и для пакетной обработки набора роликов. В качестве технологической основы выбраны Python, OpenCV, NumPy и SQLite [2-4].

Основная часть. Ключевым этапом обработки является выделение пациента на кадре и локализация опорных маркеров. Для детекции используется цветовая сегментация в пространстве HSV, поскольку она менее чувствительна к изменениям освещения, чем работа непосредственно в исходной модели BGR. После формирования бинарной маски применяются морфологические операции, позволяющие убрать шум, сгладить разрывы и оставить только релевантные контуры. Для повышения устойчивости система фильтрует найденные объекты по площади и геометрическим признакам. Это снижает число ложных срабатываний и повышает надежность измерений в реальных условиях съемки.

Параллельно с поиском маркеров решается задача сегментации тела пациента. В проекте для этого используется алгоритм K-means, который разделяет пиксели кадра на два кластера – фон и передний план. Такой подход особенно эффективен при съемке на контрастном однотонном фоне, что и предусмотрено методикой исследования. Для ускорения вычислений кластеризация выполняется не по всем пикселям, а по случайной выборке, после чего модель распространяется на весь кадр. Сформированная маска тела позволяет отсечь посторонние

объекты и дополнительно валидировать найденные маркеры, привязывая их к допустимой анатомической области [5].

После обнаружения маркеров выполняется их трекинг между соседними кадрами. Каждому маркеру присваивается идентификатор, а система сохраняет историю его положений, что позволяет сопоставлять объекты даже при кратковременном ухудшении видимости. Если маркер временно пропадает из кадра, он не удаляется сразу, а удерживается в модели в течение нескольких кадров. Дополнительно применяется сглаживание координат и измерений по скользящему окну, что уменьшает влияние шумов и случайных скачков. За счет этого временной ряд дыхательных движений становится стабильнее, а последующий расчет частоты и амплитуды дыхания оказывается более достоверным.

Важнейшей частью комплекса является калибровка масштаба. Так как исходно все расстояния измеряются в пикселях, без пересчета в физические единицы они не имеют клинической ценности. Для преобразования используется референсный квадратный маркер размером 14 мм. По его размеру на изображении определяется коэффициент пересчета пикселей в миллиметры, который может динамически обновляться при изменении условий съемки. Это решение позволяет переходить от относительных координат к количественным значениям ширины тела на разных уровнях и делает результаты сопоставимыми между различными исследованиями.

Аналитический модуль `medical_tracker.py` преобразует измеренные временные ряды в набор медицински значимых параметров. Система выделяет отдельные дыхательные циклы, определяет пики и впадины кривой, вычисляет амплитуду дыхательных движений, частоту дыхания, регулярность ритма и соотношение грудного и брюшного компонентов. Дополнительно рассчитываются статистические показатели: средние и медианные значения, стандартное отклонение, коэффициенты вариации и характеристики устойчивости сигнала. В результате пользователь получает не просто последовательность координат, а структурированный набор индикаторов, на основе которых можно оценивать особенности дыхательного паттерна и отслеживать его изменение во времени.

Для более глубокой интерпретации дыхательных паттернов система выполняет статистическую обработку временных рядов. Анализируются средние значения, медианы, разброс, а также частотные характеристики сигнала. Такой подход позволяет оценивать не только текущую амплитуду дыхательных движений, но и устойчивость ритма, наличие нерегулярности и выраженность колебаний в различных анатомических зонах. Благодаря этому программный комплекс пригоден не только для демонстрации движения маркеров, но и для накопления количественных данных, которые можно использовать в сравнительных исследованиях и при длительном наблюдении пациента.

Математическое описание обработки данных в упрощенной форме включает калибровку по опорному маркеру и последующий анализ временных рядов. Для опорного квадратного маркера известного размера $S_{ref} = 14$ мм коэффициент калибровки k определяется по формуле (1).

$$k = W_{ref\_px} / S_{ref} \quad (1)$$

Пересчет любого расстояния из пикселей в миллиметры выполняется по формуле (2).

$$L_{mm} = L_{px} / k \quad (2)$$

Для каждой анатомической зоны i ширина контура тела и соответствующий временной ряд дыхательных движений определяются по формуле (3).

$$W_{i(n)} = x_{R,i(n)} - x_{L,i(n)}, s_{i(n)} = W_{i(n)} / k \quad (3)$$

Для уменьшения влияния шума используется сглаживание по скользящему окну длиной m , как показано в формуле (4).

$$s_i^f(n) = (1 / m) \sum_{j=0}^{m-1} s_i(n - j) \quad (4)$$

По сглаженному сигналу выделяются локальные максимумы и минимумы. Амплитуда дыхательного цикла и частота дыхания рассчитываются по формуле (5).

$$A_j = s_i^f(p_j) - s_i^f(q_j), RR = 60 N_{peaks} / T \quad (5)$$

где N_{peaks} – число зарегистрированных вдохов за интервал наблюдения T .

Для оценки устойчивости ритма используется индекс регулярности, задаваемый формулой (6), а согласованность грудного и брюшного компонентов оценивается по коэффициенту корреляции согласно формуле (7).

Для оценки устойчивости ритма используется индекс регулярности

$$R = 1 - std(Delta p) / mean(Delta p) \quad (6)$$

где $Delta p$ – интервалы между соседними максимумами.

Согласованность грудного и брюшного компонентов может оцениваться по коэффициенту корреляции

$$C = corr(s_1, s_2) \quad (7)$$

Упрощенный алгоритм работы системы включает следующие этапы: считывание кадра, перевод изображения в пространство HSV, цветовую сегментацию маркеров, морфологическую фильтрацию, сегментацию тела методом K-means в пространстве LAB, валидацию маркеров по области тела, пересчет пиксельных расстояний в миллиметры, формирование временных рядов по нескольким анатомическим уровням, выделение дыхательных циклов и расчет итоговых диагностических показателей. Такое математическое описание делает методику расчета прозрачной и связывает программную реализацию с количественными параметрами дыхания.

Для хранения результатов спроектирована база данных SQLite, включающая таблицы пациентов, видеозаписей и специализированные таблицы показателей. Такое решение обеспечивает централизованное хранение медицинской информации, быстрый доступ к результатам и возможность последующего экспорта в табличные форматы. Разделение показателей по категориям упрощает статистическую обработку и сравнение нескольких исследований одного пациента. Отдельным преимуществом является возможность автоматической синхронизации отчетов и формирование структурированных выгрузок для врача или исследователя, что снижает долю ручной работы и ускоряет анализ данных.

Система поддерживает как интерактивный, так и пакетный режим работы. В интерактивном режиме пользователь получает визуальное представление процесса анализа: отображаются контур тела, координаты маркеров и текущие измеряемые значения. Это удобно при отладке алгоритмов и первичной оценке качества записи. В пакетном режиме возможна последовательная обработка нескольких видеороликов без постоянного участия оператора, что особенно полезно при анализе серий наблюдений. Наличие двух режимов делает решение универсальным для исследовательских и прикладных задач.

Отдельно важно, что в системе предусмотрены механизмы контроля качества входных данных. Программа проверяет соответствие записи базовым условиям: съемка должна вестись в профиль, на однородном контрастном фоне, при стабильном освещении и с неподвижной камерой. Рекомендуемая длительность ролика составляет от 30 секунд до 2 минут, а размещение маркеров вдоль средней линии тела позволяет анализировать согласованность движений грудной клетки, талии и бедер. Соблюдение этих условий принципиально, потому что точность детекции и корректность калибровки напрямую зависят от качества исходного видеоматериала.

Практическая значимость разработки определяется возможностью ее применения в нескольких направлениях. Во-первых, система подходит для первичного скрининга, когда необходимо быстро получить количественную оценку дыхательной активности без сложного

оборудования. Во-вторых, она может использоваться для динамического наблюдения за пациентом в процессе лечения, когда важно сопоставлять показатели между несколькими исследованиями. Наконец, предложенная архитектура может стать основой для дальнейшей интеграции с телемедицинскими сервисами и цифровыми медицинскими платформами.

Заключение. Разработанный программный комплекс решает задачу бесконтактной оценки параметров внешнего дыхания на основе видеоанализа и объединяет в едином процессе сегментацию тела, детекцию и трекинг маркеров, калибровку измерений и расчет клинически значимых показателей. Практическая ценность работы состоит в возможности использовать систему для первичного скрининга, мониторинга динамики лечения и дальнейшей интеграции в цифровые медицинские сервисы. Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов компьютерного зрения для функциональной диагностики дыхательной системы.

Список литературы

1. Ревинская, И. И. Методика оценки легочных объемов на основе записи биомеханики дыхательных движений = *Methodology for Assessing Lung Volumes Based on Recording the Biomechanics of Respiratory Movements* / И. И. Ревинская, П. В. Камлач // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 6. – С. 92–98
2. OpenCV: Open Source Computer Vision Library [Электронный ресурс]. - Режим доступа: opencv.org.
3. NumPy: фундаментальная библиотека для научных вычислений в Python [Электронный ресурс]. - Режим доступа: numpy.org.
4. SQLite: встраиваемая реляционная база данных [Электронный ресурс]. - Режим доступа: sqlite.org.
5. Scikit-learn: библиотека машинного обучения для Python [Электронный ресурс]. - Режим доступа: scikit-learn.org.

UDC 616-78

FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF EXTERNAL RESPIRATION PARAMETERS USING COMPUTER VISION

Luzhinsky A.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Scientific supervisor: Revinskaya I.I. - Senior Lecturer of the Department of ETT

Annotation. The paper presents a software system for contactless assessment of external respiration parameters based on patient video analysis. The proposed approach combines body segmentation, marker detection and tracking, automatic scale calibration, time-series processing and storage of calculated indicators in a database. The developed solution is focused on quantitative analysis of respiratory motion and can be used both in real-time operation and in batch processing mode.

The software determines the patient contour, detects reference markers, converts pixel distances into millimeters, identifies breathing cycles and calculates clinically significant indicators, including respiratory rate, amplitude and rhythm stability. The modular architecture also includes a database layer for structured storage and export of results. This makes the proposed system suitable for screening, follow-up observation and further integration into digital medical services.

Keywords. external respiration, contactless diagnostics, computer vision, spirometry, video analysis, marker tracking.

ПОРТАТИВНЫЙ АППАРАТ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ

Богданович В.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель Бондарик В.М. – к. т. н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. Предложен проект портативного аппарата искусственной вентиляции легких для экстренной помощи. Разработанный микропроцессорный алгоритм обеспечивает адаптацию параметров вентиляции к пациенту без датчиков потока, используя метод косвенной калибровки объема. Система реализует режим принудительной вентиляции легких с контролем давления, включает дыхательные паузы и активную стабилизацию давления для безопасности. Решение направлено на создание доступного и автономного устройства.

Ключевые слова: Аппарат искусственной вентиляции легких, микроконтроллер, портативная медтехника, датчик давления, автоматизация вентиляции легких.

Введение. Актуальность разработки портативных систем искусственной вентиляции легких (ИВЛ) обусловлена необходимостью оказания экстренной помощи вне стационарных условий: в машинах скорой помощи, при спасательных операциях или в условиях дефицита стационарного оборудования. В отличие от громоздких стационарных систем, портативный аппарат должен сочетать в себе надежность, малые габариты и автономность.

Основная часть. В основе работы разработанного портативного аппарата ИВЛ лежит оригинальный алгоритм микропроцессорного управления, обеспечивающий адаптивность системы к индивидуальным параметрам пациента в условиях отсутствия дорогостоящих датчиков потока.

Одной из ключевых проблем при проектировании бюджетных портативных систем является измерение объема легких. В данной работе предложен метод косвенного определения коэффициента объема.

Реализация системы управления портативным аппаратом ИВЛ базируется на взаимодействии микропроцессорного блока с исполнительными механизмами и датчиками, представленными на структурной схеме (рисунок 1). Работа устройства начинается с этапа инициализации, где пользователю предоставляется возможность выбора максимального рабочего давления. Данный параметр является критическим для обеспечения безопасности пациента. Поскольку в бюджетной конфигурации устройства отсутствует дорогостоящий датчик объема потока воздуха, в основу алгоритма положен метод расчета коэффициента объема легких. Для этого система запускает пробный цикл: насос включается на 25% мощности в прямом направлении при открытом клапане вдоха и закрытом клапане выдоха. Микроконтроллер фиксирует время t , за которое давление в контуре достигает заданного пользователем порога.

На основе полученных данных вычисляется коэффициент k по формуле 1:

$$k = v \cdot t, \quad (1)$$

где v – скорость работы насоса;

t – время работы насоса.

Этот коэффициент, хотя и не является абсолютным физическим объемом, служит базовой константой для всех последующих вычислений и настройки динамики привода.

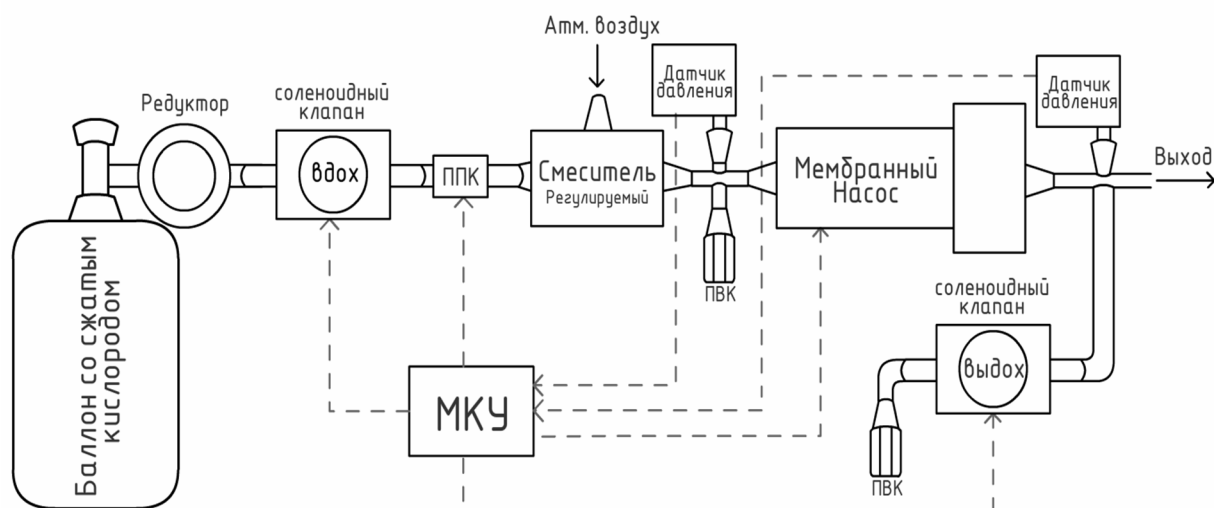


Рисунок 1 – Схема функциональная портативного аппарата ИВЛ

Следующим этапом функционирования является расчет временных и скоростных параметров дыхательного цикла на основе заданной пользователем частоты (количества циклов в минуту). Алгоритм автоматически определяет время полуцикла tb по формуле 2:

$$tb = 25/f, \quad (2)$$

где f – количество дыхательных циклов в минуту.

При этом программно заложено равенство фаз вдоха и выдоха, а для улучшения газообмена введена дыхательная пауза, составляющая $1/5$ от времени вдоха. Скорость работы насоса в рабочем режиме рассчитывается как отношение коэффициента k к времени вдоха. Такая математическая модель позволяет адаптировать интенсивность подачи газовой смеси под индивидуальную растяжимость легких пациента, обеспечивая при этом соблюдение временного регламента вентиляции.

Непосредственный процесс вентиляции реализуется через циклическое переключение состояний исполнительных механизмов, указанных на схеме. В фазе вдоха насос нагнетает смесь, клапан вдоха открыт, клапан выдоха – закрыт. В следующей за ней паузе насос останавливается, а клапан на вдох закрывается, удерживая давление. Фаза выдоха характеризуется открытием клапана выдоха при закрытом клапане вдоха, что позволяет смеси беспрепятственно выходить из легких. Завершается цикл повторной паузой с закрытием клапана выдоха. Весь процесс сопровождается непрерывным мониторингом состояния системы: при падении давления в дыхательном контуре ниже допустимого уровня микроконтроллер мгновенно выводит предупреждение на ЖКИ-дисплей, сигнализируя о возможной разгерметизации или нехватке дыхательной смеси.

Особое значение для стабильности системы имеет узел, который предотвращает возникновение избыточного или разряженного давления в трубке перед насосом. Алгоритм управления предусматривает динамическую корректировку степени открытия пропорционального пневматического клапана (ППК) на основе данных с датчика давления. При обнаружении отклонений микроконтроллер пропорционально пересчитывает угол открытия клапана, где с каждой последующей итерацией изменяемый угол становится всё меньше, до тех пор, пока система не станет равновесной. Такое регулирование позволяет компенсировать пульсации давления в реальном времени, обеспечивая плавность подачи смеси и защищая механические компоненты аппарата от перегрузок. Сочетание описанного алгоритма с выбранной архитектурой позволяет создать надежную и автоматизированную систему, способную поддерживать жизнедеятельность пациента в экстренных условиях.

Заключение. В результате работы была спроектирована микропроцессорная система управления портативным аппаратом искусственной вентиляции легких, ориентированная на применение в условиях экстренной медицины. На основе анализа существующих методов вентиляции был выбран алгоритм управления по давлению, который в сочетании с предложенным методом косвенного расчета коэффициента объема легких позволяет адаптировать работу устройства под индивидуальные особенности пациента без использования дорогостоящих датчиков потока.

Практическая значимость работы заключается в создании экономически доступного решения на базе микроконтроллерного управления. Интеграция системы активного мониторинга давления и автоматизированного управления пропорциональным пневматическим клапаном позволила минимизировать риски возникновения баротравм и повысить стабильность подачи газовой смеси. Предложенная архитектура устройства может служить базой для создания опытного образца портативного реанимационного оборудования.

Список литературы

1. Горячев, А.С. Основы ИВЛ / А.С. Горячев, И.А. Савин. – Москва : ООО «МД», 2013. – 258 с.
2. Алексеев, В.Ф. Конструирование и технология электронных систем. Курсовое проектирование. / А.А. Костюкевич, В.М. Бондарик, А.П. Достанко, В.Ф. Алексеев. – Минск : БГУИР, 2012. – 119 с.

UDC 615.47:004.31

PORTABLE ARTIFICIAL LUNG VENTILATION DEVICE

Bahdanovich V.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Bondarik V.M. – Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor of the Department of ETT

Annotation. A project of a portable artificial lung ventilation device for emergency care is proposed. The developed microprocessor-based algorithm enables adaptation of ventilation parameters to the patient without flow sensors, using an indirect volume calibration method. The system implements a pressure-controlled mandatory ventilation mode, includes breathing pauses, and active pressure stabilization for safety. The solution is aimed at creating an affordable and autonomous device.

Keywords: Artificial lung ventilation device, microcontroller, portable medical equipment, pressure sensor, ventilation automation

АМПЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ ГЛЮКОМЕТР С МОБИЛЬНЫМ ПРИЛОЖЕНИЕМ

Немченкова А.Д.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Лушакова М.С. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. Представлена разработка портативного глюкометра, основанного на амперометрическом методе измерения. Проведен анализ существующих аналогов и методов, на основе которого выбрана оптимальная архитектура устройства. Предложена структурная схема глюкометра, включающая модуль беспроводной передачи данных для взаимодействия с мобильным устройством. Приведена математическая модель для вычисления концентрации глюкозы на основе данных аналого-цифрового преобразователя.

Ключевые слова: глюкометр, амперометрический метод, микроконтроллер, мобильное приложение.

Введение. Сахарный диабет является одним из наиболее распространенных неинфекционных заболеваний в мире, и эффективный контроль гликемии требует регулярных измерений уровня глюкозы в крови [1]. Современные тенденции развития медицинской техники направлены на интеграцию портативных диагностических устройств с мобильными платформами, что позволяет автоматизировать сбор данных, вести историю наблюдений и своевременно корректировать терапию. Традиционные глюкометры, обладая встроенной памятью, не всегда предоставляют удобные инструменты для анализа долгосрочной динамики показателей [2].

Таким образом, актуальной задачей является разработка амперометрического глюкометра, оснащенного модулем беспроводной связи для синхронизации с мобильным приложением. Данный подход позволяет объединить точность амперометрического метода измерения с возможностями современных смартфонов по обработке и визуализации данных.

Основная часть. При разработке глюкометра с возможностью беспроводной передачи данных на мобильное устройство был использован амперометрический метод измерения глюкозы, основанный на накоплении электронов, возникающих при окислении ферроцианида калия, который предварительно восстановился в ходе ферментативной реакции глюкозы с глюкооксидазой на тест-полоске [3].

Для проектирования устройства необходимо:

- обеспечить точное преобразование слабого тока электрохимической реакции тест-полоски в цифровой сигнал;
- обеспечить надежную целостную передачу данных по беспроводному каналу связи с минимальным энергопотреблением;
- разработать интуитивно понятный пользовательский интерфейс в мобильном приложении для отображения результатов и статистики.

Для решения вышеперечисленных задач разработана структурная схема устройства, представленная на рисунке 1, которая отражает взаимодействие всех ключевых функциональных узлов [4]:

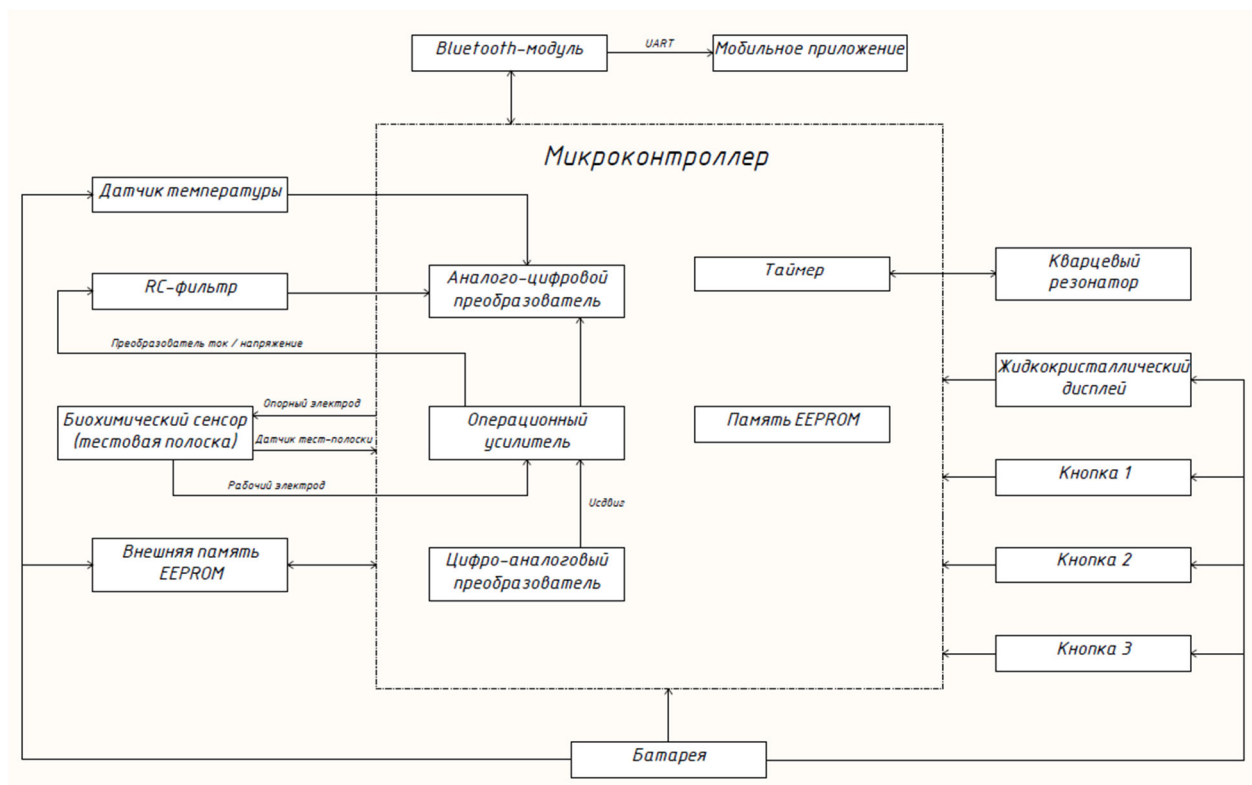


Рисунок 1 – Структурная схема амперометрического глюкометра

Центральным элементом устройства является микроконтроллер *PIC16LF178X*, выбранный благодаря своей энергоэффективности и наличию необходимой периферии: 12-битного АЦП и интерфейсов связи [5]. Тест-полоска подключается через разъем, а возникающий ток преобразуется в напряжение с помощью встроенного операционного усилителя. Датчик температуры обеспечивает коррекцию результатов в зависимости от температуры окружающей среды.

Ключевым отличием разрабатываемой системы является наличие модуля беспроводной связи на базе *Bluetooth Low Energy (BLE)*, который обеспечивает передачу результатов измерений в мобильное приложение, установленное на смартфоне пользователя. Передача данных происходит автоматически сразу после вывода результатов измерения на дисплей глюкометра, что исключает необходимость выполнения пользователем дополнительных действий для синхронизации, упрощает устройство и экономит заряд.

Для данного типа устройств важным является создание мобильного приложения для обеспечения пользователю доступа к данным о измерениях в любой момент времени. В разрабатываемом приложении результаты измерений отображаются в формате: «уровень глюкозы в крови, дата, время». Особое внимание уделено возможности просмотра результатов за выбранный промежуток времени, что позволяет пользователю отслеживать динамику изменений уровня глюкозы и выявлять закономерности, связанные с режимом питания, физической активностью или приемом лекарственных препаратов.

Для получения итогового значения концентрации глюкозы используется математическая обработка цифрового сигнала с АЦП. После усреднения выборок применяется следующая формула [6]:

$$Y = m \cdot X + C, \quad (1)$$

где Y – концентрация глюкозы в крови, ммоль/л;

m – крутизна;

X – среднее значение АЦП выходного напряжения операционного усилителя;
 C – константа.

В первую очередь результат измерения выводится на ЖК-дисплей глюкометра, что позволяет пользователю оперативно узнать уровень глюкозы независимо от наличия смартфона, параллельно с отображением на экране данные автоматически передаются в мобильное приложение для последующего хранения и анализа. Если под рукой нет телефона или синхронизация временно недоступна, глюкометр сохраняет последние измерения во встроенную память, что позволяет просмотреть до 500 последних записей непосредственно на устройстве. Это обеспечивает автономность использования прибора и гарантирует доступ к актуальным данным в любой ситуации

Заключение. Выполнено проектирование амперометрического глюкометра с интеграцией мобильного приложения. Предложена архитектура, объединяющая аппаратную часть устройства на базе микроконтроллера PIC16LF178X с программным обеспечением для смартфона, обеспечивающим автоматический сбор и анализ данных. Автономность использования прибора обеспечивается за счет первоочередного вывода результатов на встроенный ЖК-дисплей и сохранения более 500 последних записей во внутренней памяти микроконтроллера при отсутствии синхронизации со смартфоном. Предложено использование разработанной структурной схемы и математической модели вычисления концентрации глюкозы при создании современных средств самоконтроля для пациентов с сахарным диабетом.

Список литературы

1. International Diabetes Federation [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://idf.org/about-diabetes/diabetes-facts-figures/> – Дата доступа: 17.02.2026.
2. Как работает глюкометр [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://medoptica.by/articles/kak-rabotaet-glyukometr> – Дата доступа: 17.02.2026.
3. Амперометрия: обзор [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.jove.com/ru/science-education/v/14570/amprometry-overview> – Дата доступа: 17.02.2026.
4. Эмануэль В.Л., Карягина И.Ю., Эмануэль Ю.В. Портативные системы самоконтроля и лабораторный анализ концентрации глюкозы в крови // Лабораторная медицина. – 2003. – №6.
5. Microchip Technology [Электронный ресурс]: Documentation / Programming Specifications. – Режим доступа: 41457E.pdf.
6. Microchip Technology [Электронный ресурс]: Documentation / Application Notes. – Режим доступа: 00001560A.pdf.

УДК 616-71:612.122.1

AMPEROMETRIC GLUCOSE METER WITH A MOBILE APPLICATION

Nemchenkova A.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Lushakova M.C. – Senior Lecturer of the Department of ETT

Annotation. This article presents the development of a portable glucometer based on the amperometric measurement method. An analysis of existing materials and methods was conducted, which served as the basis for selecting the optimal device architecture. A flowchart of a glucometer is proposed, including a wireless data transmission module for interaction with a mobile device. A mathematical model for calculating glucose concentration based on analog-to-digital converter data is presented. The results can be used to develop modern glucose self-monitoring tools.

Keywords: glucose meter, amperometric method, microcontroller, mobile application.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИИ-АССИСТЕНТОВ В СИСТЕМАХ ЖИДКОСТНОЙ ЦИТОЛОГИИ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЧТЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Печёнов М.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Бондарик В.М. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. Рассмотрены подходы к применению ИИ-ассистентов в жидкостной цитологии (LBC) для повышения производительности лабораторного скрининга. Выполнен сравнительный анализ полуавтоматических имиджинг-систем и цифровой цитологии на основе полноформатного сканирования препарата (WSI) и методов машинного обучения. Показано, что ИИ-подсказки позволяют сократить время чтения препарата без ухудшения ключевых показателей качества при соблюдении ограничений по нагрузке и протоколов валидации.

Ключевые слова: жидкостная цитология, скрининг, искусственный интеллект, цифровая цитология, время чтения, производительность.

Введение. Жидкостная цитология (Liquid-Based Cytology, LBC) широко применяется в скрининге заболеваний шейки матки благодаря высокой эффективности метода. Рост объёма исследований и дефицит подготовленных специалистов приводят к увеличению нагрузки и времени выдачи результатов. Поэтому актуальна интеграция ИИ-ассистентов, поддерживающих специалиста на этапах предварительного скрининга, приоритизации и навигации по объектам интереса, сокращая время чтения при сохранении диагностического качества [1-4].

Цель работы – обобщить данные о влиянии ИИ-ассистентов в LBC на время чтения результатов и предложить практический подход к их внедрению в лабораторный процесс с учетом требований к качеству и ограничений по нагрузке [5-8].

Материалы и методы. Проведён анализ 13 источников (научных публикаций и официальных документов), посвящённых полуавтоматическим имиджинг-системам для LBC (ThinPrep Imaging System, BD FocalPoint GS) [1, 2, 5, 6] и системам цифровой цитологии на базе полноформатного сканирования препарата (WSI) с ИИ-подсказками (в т. ч. Hologic Genius Digital Diagnostics System) [3, 4, 7, 9-11]. В качестве первичного показателя эффективности рассматривалось среднее время чтения/скрининга одного препарата (с/препарат), а также вторичные метрики: согласованность заключений, чувствительность/специфичность для клинически значимых категорий и влияние нагрузки на показатели качества [5-8].

Основная часть. Полуавтоматические имиджинг-системы (первое поколение ассистентов) выполняют предварительный анализ препарата и предлагают ограниченное число полей зрения для просмотра. В хронометражном исследовании для ThinPrep Imaging System показано сокращение времени скрининга в среднем на 42 % относительно ручного чтения [1]. В трехстороннем сравнительном исследовании подтверждена сопоставимость диагностических результатов между режимами работы при корректной организации процесса [2]. Однако ускорение не должно достигаться за счет превышения безопасной нагрузки: при повышении ежедневного числа препаратов ухудшаются показатели эффективности скрининга даже при использовании автоматизированных систем [5].

Современные ИИ-ассистенты (второе поколение) опираются на цифровое полноформатное сканирование клеточного пятна (WSI) и формируют для читателя «галерею» объектов интереса, снижая объём навигации по препарату и число повторных просмотров. В исследовании организации рабочего процесса показано сокращение времени чтения при переходе с ThinPrep Imaging System на Genius Digital Diagnostics System (с 138,0 с до 70,1 с на препарат) при сохранении сопоставимой точности [4]. Клинические оценки и валидационные

работы подтверждают применимость подхода «цифровая цитология + ИИ» в лабораторных условиях [9-11].

Наиболее выраженный эффект по времени показан в исследованиях ИИ-подсказок на основе методов глубокого обучения при оценке LBC по полносканированным изображениям (WSI): в многочитательском дизайне среднее время чтения снизилось с 218 с до 30 с на препарат. При этом показатели качества интерпретации сохранялись, а у менее опытных специалистов отмечался рост диагностической уверенности [3]. Ключевой механизм экономии времени – уменьшение «поискового» этапа, когда специалист тратит значительную долю времени на навигацию и поиск редких диагностически значимых клеток.

Для практического внедрения ИИ-ассистента целесообразно оценивать эффект в двух плоскостях: (1) экономия времени чтения препарата и (2) соблюдение ограничений по нагрузке, установленных для цитологического скрининга. Официальные документы и регуляторные материалы указывают необходимость расчета нагрузки с учетом полуавтоматизированных режимов и соблюдения нормативов по максимальному числу препаратов за смену [6-8]. В противном случае повышение пропускной способности может сопровождаться ростом диагностических ошибок [5].

Сводные данные по влиянию различных классов ассистентов на время чтения приведены в таблице 1. Представленная таблица может использоваться как аргумент для обоснования внедрения в лаборатории и для выбора сценария пилотного тестирования.

Таблица 1 – Примеры влияния ИИ-ассистентов на время чтения/скрининга препаратов LBC

Класс решения	Система/сравнение	Показатель времени	Результат	Источник
Имиджинг (полуавтомат.)	ThinPrep Imaging System (сравнение с ручным чтением)	Время скрининга	–42 %	[1]
Цифровая цитология + ИИ	Genius Digital Diagnostics System vs ThinPrep Imaging System	Время чтения, с/препарат	138,0 → 70,1	[4]
Глубокое обучение (WSI)	ИИ-подсказки (многочитательское исследование)	Время чтения, с/препарат	218 → 30	[3]

Практический подход к внедрению. Для лаборатории, планирующей внедрение ИИ-ассистента в LBC, рекомендуется следующий минимальный план:

- определить целевой участок процесса (предскрининг, триаж, пересмотр патологом);
- провести локальную валидацию (согласованность заключений, частота дообследований, доля недооценок) по репрезентативной выборке до и после внедрения [10, 11];
- фиксировать метрики времени (с/препарат) и анализировать распределения, а не только средние значения;
- рассчитать допустимую нагрузку с учетом режима работы и регуляторных рекомендаций [6-8];
- внедрить внутренний контроль качества (выборочная повторная проверка, анализ расхождений, мониторинг лабораторных индикаторов).

Ограничения. Данные по времени и качеству зависят от уровня подготовки читателей, протокола разметки объектов интереса и качества сканирования. Перенос моделей между лабораториями может требовать дополнительной настройки из-за различий в подготовке препаратов и оптике сканирования [12, 13].

Заключение. ИИ-ассистенты в системах жидкостной цитологии позволяют существенно сократить время чтения результатов: для имиджинг-систем показано снижение времени скрининга на 42% [1], а для решений на базе цифровой цитологии и методов глубокого обучения – сокращение времени чтения в 2 раза и более (до ~7 раз в отдельных исследованиях) [3, 4]. Практический эффект достигается при обязательной лабораторной валидации, контроле метрик качества и соблюдении ограничений по нагрузке [5-8]. Перспективы дальнейшего

развития ИИ-ассистентов в ЛВС связаны с переходом к более глубокой интеграции в лабораторный рабочий процесс: от подсказок при просмотре к поддержке триажа, автоматизированному контролю качества препарата и стандартизации критериев интерпретации. Одним из ключевых направлений является накопление репрезентативных локальных наборов данных и проведение многоцентровых проверок, что позволит повысить переносимость алгоритмов между лабораториями и снизить риск снижения качества при росте производительности. Дальнейшее развитие также видится в создании прозрачных правил принятия решений (интерпретируемых подсказок), настройке порогов чувствительности под задачи конкретной лаборатории и в формализации протоколов внедрения и мониторинга качества после запуска системы.

Список литературы

1. Automated screening versus manual screening: a comparison of the ThinPrep imaging system and manual screening in a time study / D. Schledermann, T. Hyldebrandt, D. Ejersbo, B. Hoelund // *Diagn Cytopathol*. 2007. Vol. 35, No 6. P. 348-352. DOI: 10.1002/dc.20640.
2. A three-armed trial of the ThinPrep Imaging System / J. M. Roberts, J. K. Thurlow, R. C. Bowditch [et al.] // *Diagn Cytopathol*. 2007. Vol. 35, No 2. P. 96-102. DOI: 10.1002/dc.20600.
3. Deep learning enabled liquid-based cytology model for cervical precancer and cancer detection / P. Xue [et al.] // *Nat Commun*. 2025. Vol. 16, No 1. Art. 3506. DOI: 10.1038/s41467-025-58883-3.
4. Impact of the Genius Digital Diagnostics System on workflow and accuracy compared with the ThinPrep Imaging System for review of ThinPrep Papanicolaou tests / K. M. Murphy [et al.] // *Am J Clin Pathol*. 2025. Vol. 164, No 5. P. 746-751. DOI: 10.1093/ajcp/aaqf099.
5. Increasing cytotechnologist workload above 100 slides per day using the BD FocalPoint GS imaging system negatively affects screening performance / A. W. Levi [et al.] // *Am J Clin Pathol*. 2012. Vol. 138, No 6. P. 811-815. DOI: 10.1309/AJCPTYDD9G2NCUMF.
6. SUMMARY OF SAFETY AND EFFECTIVENESS DATA (SSED): BD FocalPoint GS Imaging System (P950009/S008) [Электронный ресурс]. FDA, 2008. Дата доступа: 01.03.2026.
7. Genius Digital Diagnostics System with Genius Cervical AI. Instructions for Use. MAN-11010-001 Rev. 002 (05-2024) [Электронный ресурс]. Hologic, 2024. Дата доступа: 01.03.2026.
8. How Laboratorians Can Safely Calculate Workload for FDA-Approved Semi-Automated Gynecologic Cytology Screening Devices [Электронный ресурс]. FDA/CMS, 2010. Дата доступа: 01.03.2026.
9. Comparison of the Hologic Genius Digital Diagnostics System with the ThinPrep Imaging System - A retrospective assessment / H. Ikenberg [et al.] // *Cancer Cytopathol*. 2023. Vol. 131, No 7. P. 424-432. DOI: 10.1002/cncy.22695.
10. Validation of AI-assisted ThinPrep Pap test screening using the Genius Digital Diagnostics System / R. L. Cantley [et al.] // *J Pathol Inform*. 2024. Vol. 15. Art. 100391. DOI: 10.1016/j.jpi.2024.100391.
11. Assessment of the efficacy and accuracy of cervical cytology screening with the Hologic Genius Digital Diagnostics System / E. Elishaev [et al.] // *Cancer Cytopathol*. 2025. Art. e70022. DOI: 10.1002/cncy.70022.
12. A Deep Learning Model for Cervical Cancer Screening on Liquid-Based Cytology Specimens in Whole Slide Images / F. Kanavati [et al.] // *Cancers (Basel)*. 2022. Vol. 14, No 5. Art. 1159. DOI: 10.3390/cancers14051159.
13. A systematic review of deep learning-based cervical cytology screening: from cell identification to whole slide image analysis / P. Jiang [et al.] // *Artif Intell Rev*. 2023. Vol. 56 (Suppl 2). P. 2687-2758. DOI: 10.1007/s10462-023-10588-z.

UDC 616.618-7

AI ASSISTANTS IN LIQUID-BASED CYTOLOGY SYSTEMS FOR REDUCING RESULT READING TIME

Piachonau M.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Bondarik V.M. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ETaT

Annotation. This paper reviews AI-assisted approaches in liquid-based cytology (LBC) aimed at improving screening productivity. Two solution classes are compared: semi-automated imaging systems and digital cytology based on whole-slide imaging with machine learning assistance. Published evidence demonstrates a substantial reduction in slide review time while maintaining quality metrics, provided that workload limits and laboratory validation protocols are followed.

Keywords: liquid-based cytology, screening, artificial intelligence, digital cytology, reading time, productivity.

ПОРТАТИВНЫЙ 3-Х КАНАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФ С WI-FI МОДУЛЕМ

Блажко У.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Лушакова М.С. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. Представлена структурная схема портативного 3-х канального электрокардиографа с Wi-Fi модулем на базе микроконтроллера STM32H743VIT6. Устройство предназначено для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, включая выявление нарушений ритма, ишемических изменений и других патологий и может быть использовано в системах телемедицины для удаленного мониторинга состояния пациентов

Ключевые слова: электрокардиограф, ЭКГ, микроконтроллер, STM32H743VIT6, структурная схема, Wi-Fi, Bluetooth

Введение. Сердечно-сосудистые заболевания занимают лидирующие позиции в структуре смертности населения. Одним из традиционных методов диагностики является использование стационарных электрокардиографов, требующих присутствия медицинского персонала, что ограничивает возможность непрерывного мониторинга. Таким образом, разработка портативных систем дистанционного мониторинга ЭКГ является актуальным направлением в мобильном здравоохранении. Особенностью представленного устройства является встроенный Wi-Fi и Bluetooth модуль, обеспечивающий передачу зарегистрированных биомедицинских сигналов на удаленный сервер или мобильное приложение.

Основная часть. 3-х канальный электрокардиограф позволяет получить данные о частоте ритма, сердечных сокращениях. При помощи аппарата можно выявить малейшие признаки кислородного голодания, а также утолщения отделов сердца, ишемической болезни, аритмии, инфаркта миокарда [1].

В качестве программно-аппаратной платформы для портативного электрокардиографа был выбран микроконтроллер STM32H743VIT6. Микроконтроллер имеет широкий набор периферийных интерфейсов для обеспечения гибкости в подключении внешних устройств. Среди них четыре порта I2C, четыре порта UART, шесть портов SPI (с поддержкой I2S) и два порта CAN. Это позволяет использовать его в различных устройствах, требующих высокой скорости передачи данных. Микроконтроллер STM32H743VIT6 имеет три 16-битных аналогово-цифровых преобразователя (АЦП), два 12-битных цифро-аналоговых преобразователя (ЦАП) и встроенный датчик температуры для мониторинга температуры процессора [2]. Выбор данного микроконтроллера обусловлен высокой производительностью (ядро Cortex-M7 с частотой до 480 МГц), а также достаточным объемом памяти (2 Мбайт Flash и 1 Мбайт RAM) для реализации алгоритмов цифровой фильтрации и анализа ЭКГ в реальном времени.

Согласно структурной схеме проектируемого устройства, представленной на рисунке 1, разрабатываемый 3-х канальный портативный кардиограф состоит из следующих основных функциональных блоков: кабель ЭКГ с электродами, блок обработки сигнала ЭКГ, микроконтроллер STM32H743VIT6 со встроенными аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП), модуль беспроводной связи (Wi-Fi/Bluetooth), TFT-дисплей, карта памяти для хранения данных, а также аккумуляторная батарея с блоком питания.

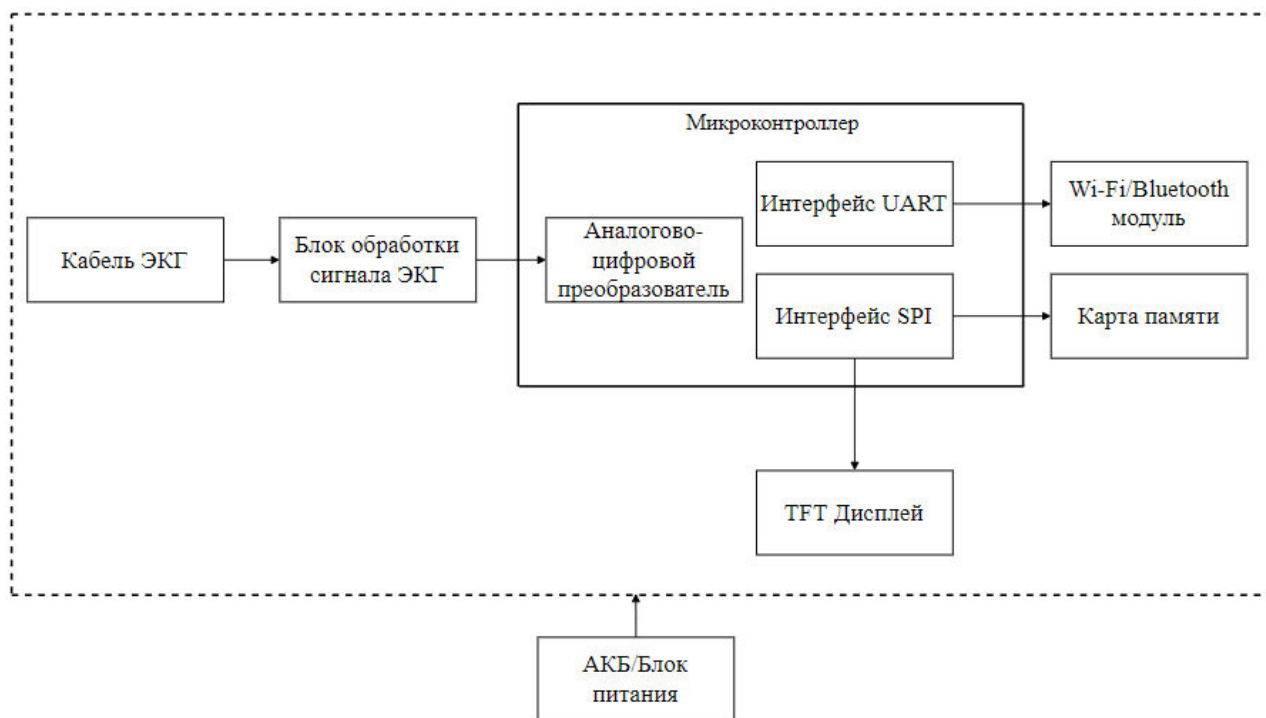


Рисунок 1 – Схема электрическая структурная портативного 3-х канального электрокардиографа с Wi-Fi модулем

Кабель ЭКГ подключается к пациенту с помощью трех пар электродов, соответствующих трем каналам съема электрокардиосигнала. Сигналы с электродов поступают на блок обработки сигнала ЭКГ, который выполняет первичное усиление, фильтрацию помех и подавление синфазной составляющей. Далее обработанный аналоговый сигнал с выхода блока обработки поступает на вход микроконтроллера STM32H743VIT6, где оцифровывается с помощью трех встроенных 16-битных АЦП, работающих одновременно. Микроконтроллер не только оцифровывает сигналы, но и реализует алгоритмы цифровой обработки: подавление сетевых помех режекторным фильтром, выделение QRS-комплексов, расчет вариабельности сердечного ритма. Благодаря высокой тактовой частоте и большому объему памяти возможна работа в режиме реального времени без потери данных.

Карта памяти служит для резервного хранения данных. Это особенно важно при потере связи с внешними устройствами – запись сохраняется локально и может быть передана позже. Используется карта типа microSD с файловой системой FAT32 для совместимости с ПК. Карта памяти подключается к микроконтроллеру по интерфейсу SPI или SDIO.

Модуль Wi-Fi/Bluetooth обеспечивает двустороннюю связь: передачу зарегистрированных сигналов на внешние устройства и прием управляющих команд (например, запуск/остановка записи, смена режима). В зависимости от условий может использоваться как Bluetooth для связи с мобильным приложением, так и Wi-Fi для передачи данных в облачный сервис. Модуль подключается к микроконтроллеру по интерфейсу UART или SPI.

TFT-дисплей позволяет визуально контролировать качество наложения электродов и корректность регистрации сигнала непосредственно во время съема. На экран также может выводиться сообщение о критических изменениях ритма или низком заряде батареи. TFT-дисплей подключается по SPI или параллельному интерфейсу.

Питание всех узлов осуществляется от аккумуляторной батареи через блок питания, который содержит стабилизаторы напряжения для получения необходимых уровней 3.3 В и 5 В.

Заключение. В работе представлена разработка портативного трехканального электрокардиографа, предназначенного для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний.

Устройство позволяет регистрировать ЭКГ по трем каналам, выявлять нарушения ритма, ишемические изменения и другие патологии на ранних стадиях.

Благодаря использованию микроконтроллера STM32H743VIT6 обеспечивается высокая точность измерений и возможность синхронной обработки сигналов. Наличие Wi-Fi/Bluetooth модуля позволяет передавать данные врачу в режиме реального времени, что делает устройство эффективным инструментом для телемедицины и удаленного мониторинга пациентов из групп риска.

Список литературы

1. MedMart [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://medmart.pro/catalog/elektrokardiografy-3-kanalnye> – Дата доступа: 20.02.2026.
2. Вольтик [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://volti.ru/shop/stm32h743vit6-dev-board/> – Дата доступа: 21.02.2026.

UDC 612.171.1+004.772

PORTABLE 3-CHANNEL ELECTROCARDIOGRAPH WITH WI-FI MODULE

Blazhko U.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Lushakova M.C. – Senior Lecturer at the Department of ETT

Annotation. A block diagram of a portable 3-channel electrocardiograph with a Wi-Fi module based on the STM32H743VIT6 microcontroller is presented. The device is designed for the diagnosis of cardiovascular diseases, including the detection of arrhythmias, ischemic changes and other pathologies and can be used in telemedicine systems for remote patient monitoring.

Keywords: electrocardiograph, ECG, microcontroller, STM32H743VIT6, block diagram, Wi-Fi, Bluetooth

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ НЕИНВАЗИВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

Степанюк Е. О.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Лушакова М.С. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. Научная и практическая новизна программно-аппаратного комплекса состоит в интеграции измерительного устройства с мобильным приложением, обеспечивающим автоматическое сохранение измеренного значения артериального давления, расчет усредненных показателей за период и визуализацию трендов, что повышает диагностическую ценность мониторинга.

Ключевые слова: микропроцессорная техника, осциллометрический метод, артериальное давление, мобильное приложение, телемедицина.

Введение. В современном мире контроль артериального давления является основой для профилактики и лечения заболеваний, связанных с сердечно-сосудистой системой. Современные требования к медицинскому оборудованию диктуют необходимость создания устройств, способных не только к измерению артериального давления, но и к накоплению и анализу данных, а также интеграции в систему персональной телемедицины. В данной работе предлагается решение, которое будет направлено на устранение разрыва между прецизионным измерением и интеллектуальным анализом данных [1].

Основная часть. При разработке комплекса решались две ключевые задачи: обеспечение помехоустойчивости процесса измерения и создание продуманного пользовательского интерфейса для анализа измеренных параметров.

Структурная схема аппаратной части (рисунок 1) состоит из микроконтроллера ADuC7026 компании Analog Devices, отвечающего за управление исполнительными механизмами (нагнетание давления, регулирование работы клапана) и блока обработки сигнала. Первичный сигнал с датчика давления проходит через аналоговый фильтр нижних частот, благодаря этому происходит подавление высокочастотных помех на начальном этапе. Дальнейшая фильтрация и анализ осуществляются программно.

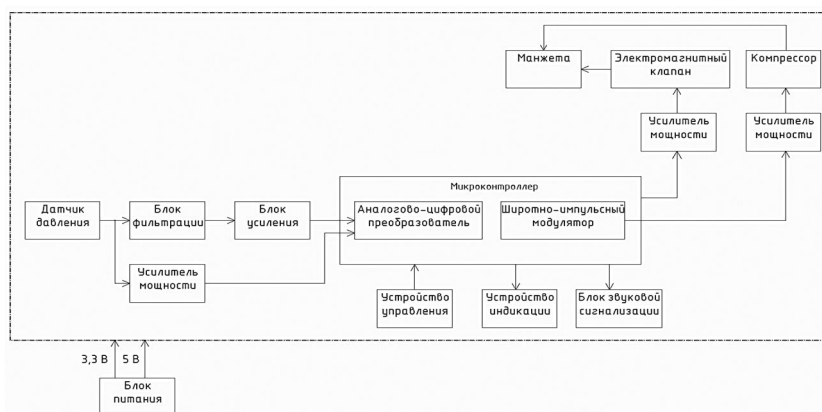


Рисунок 1 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса для неинвазивного измерения артериального давления

Основным источником погрешностей при использовании осциллометрического метода являются интенсивные шумы, генерируемые работой компрессора. Эти помехи, наслаиваясь на полезный сигнал, существенно осложняют выделение пульсовых колебаний. В

разработанном устройстве для подавления данных шумов применяется цифровой фильтр на основе конечной импульсной характеристики [2]. Было зафиксировано, что использование фильтра обеспечивает увеличение отношения сигнал-шум в диапазоне 18-20 дБ. Это, в свою очередь, гарантирует устойчивое распознавание осцилляций и точный расчет систолического и диастолического давления.

Существенным дополнением к аппаратной части для данного типа устройств часто является наличие мобильного приложения [3]. В соответствии с этим было разработано собственное приложение, адаптированное к функциям устройства. Передача данных на телефон выполняется по беспроводному протоколу. Разработанное приложение берет на себя функцию накопления измерительной информации, включая показатели систолы, диастолы и частоты пульса, с обязательной фиксацией времени каждого замера. Помимо хранения, программа предоставляет инструменты для анализа: вычисление средних значений за выбранные временные промежутки (от суток до месяца), формирование наглядных графиков для оценки динамики состояния, а также возможность выгрузки накопленных данных во внешние форматы для детального изучения.

Поскольку прибор рассчитан на автономную работу, особое внимание уделялось снижению энергопотребления. В конструкции применены схемотехнические решения, сокращающие расход заряда, а также задействованы режимы пониженного энергопотребления микроконтроллера в перерывах между измерениями.

Заключение. В программно-аппаратном комплексе, ориентированном на контроль артериального давления, удалось объединить достоинства прецизионной измерительной техники с возможностями современных мобильных технологий по обработке и представлению данных. Примененный метод цифровой фильтрации эффективно противодействует электромеханическим помехам в аналогичных устройствах. Встраивание мобильного приложения в экосистему устройства превращает традиционный тонометр в полноценный инструмент персонализированной медицины, расширяя возможности мониторинга и повышая ценность получаемой информации для оценки состояния пациента.

Список литературы

1. Щапова Л. В. Актуальные проблемы автоматизации амбулаторного контроля артериального давления // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2023. – №. 4. – С. 265-269.
2. Строев, В. М. Проектирование измерительных медицинских приборов с микропроцессорным управлением / В. М. Строев. – Тамбов: ФГБОУ ВПО, 2012. – С. 78–85.
3. Татаринова Т.Е., Асекритова А.С., Татаринова О.В. Перспективы использования дистанционного мониторинга артериального давления на уровне первичного звена // *Якутский медицинский журнал*. – 2025.

UDC 621.3.087:616.12-07:004.77

HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR NON-INVASIVE BLOOD PRESSURE MEASUREMENT

Stepaniuk E. O.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Lushakova M.S. – Senior Lecturer of the Department of ETT

Annotation. The scientific and practical novelty of the software and hardware complex consists in the integration of a measuring device with a mobile application that provides automatic storage of the measured blood pressure value, calculation of average values over a period and visualization of trends, which increases the diagnostic value of monitoring.

Keywords: microprocessor technology, oscillometric method, blood pressure, mobile application, telemedicine.

ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИКАЦИИ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА 3Д ПРИНТЕРЕ

Юшко Д.Е.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Шахлевич Г.М. – к. ф.-м., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. В статье рассматривается технология модификации деталей, изготовленных методом послойного наплавления (FDM) на 3D-принтерах, с целью снижения анизотропии механических свойств и повышения общей прочности. Предлагаемый подход включает термическую обработку (отжиг) в контролируемой среде для улучшения межслойной адгезии и кристаллизации полимера. Эксперименты на образцах из полиэтилентерефталата гликоль-модифицированного (PETG) демонстрируют значительное увеличение предела прочности при растяжении – до трехкратного роста по сравнению с необработанными деталями. Метод позволяет использовать доступные открытые 3D-принтеры без термокамеры, минимизируя затраты на оборудование.

Ключевые слова. 3D-печать, FDM-технология, анизотропия, отжиг, полиэтилентерефталат гликоль-модифицированный (PETG), межслойная адгезия, механические свойства, термопласты.

Введение. В последние годы в Беларуси, как и в других странах, наблюдается значительное распространение 3D-принтеров в научных лабораториях, образовательных учреждениях и на производстве. Эти устройства применяются для быстрого прототипирования, изготовления оснастки и даже функциональных деталей. Наиболее доступной и экономичной технологией 3D-печати остается метод послойного наплавления (Fused Deposition Modeling, FDM), где термопластичный филамент экструдируется через нагретое сопло и наносится слой за слоем на платформу. Самые распространенные принтеры – открытые (без термокамеры), такие как модели на базе Prusa i3 или Ender 3 (рисунок 1), которые стоят от нескольких сотен долларов и просты в эксплуатации.



Рисунок 1 – Открытый 3Д принтер

Однако, использование технологии послойного наплавления для создания функциональных изделий сдерживается ключевым недостатком — анизотропией свойств и низкой прочностью. Анизотропия в FDM-печати обусловлена слоистой структурой материала [1]. Каждый слой формируется из отдельных нитей, между которыми возникают воздушные зазоры и слабые межслойные связи из-за неполной диффузии полимерных цепей. Это приводит к тому, что прочность вдоль слоев (в плоскости XY) значительно выше, чем в направлении Z (между слоями). Факторами, усугубляющими анизотропию, являются ориентация раstra и неравномерность охлаждения. Кроме того, качество печати сильно зависит от внешних условий: влажности и температуры окружающего воздуха. Гигроскопичные полимеры, такие как PLA, поглощают влагу, что снижает адгезию слоев и

вызывает внутренние напряжения, приводящие к деформациям или растрескиванию (рисунок 2).



Рисунок 2 – Расслоение вдоль слоев

Открытые принтеры, не имеющие защитного корпуса, особенно уязвимы к этим факторам: сквозняки и колебания температуры вызывают коробление деталей, особенно при печати материалов с высокой усадкой. Закрытые принтеры с термокамерой (например, модели Ultimaker или Raise3D) решают эту проблему, поддерживая стабильную температуру в камере (до 100–120°C), что улучшает адгезию и снижает напряжения. Однако такие устройства стоят в 2–5 раз дороже и требуют более сложного обслуживания (рисунок 3).



Рисунок 3 – 3Д принтер с термокамерой

Альтернативные технологии 3D-печати, такие как стереолитография (SLA) на основе фотополимеров, обеспечивают изотропные свойства благодаря равномерному отверждению под УФ-излучением (рисунок 4). В SLA полимерная смола (обычно акрилатные или эпоксидные соединения) полимеризуется слой за слоем, образуя монолитную структуру без выраженных границ. Однако оборудование для SLA (например, принтеры Formlabs) и расходные материалы стоят в 5–10 раз дороже FDM, а постобработка включает промывку в растворителях и дополнительное отверждение.

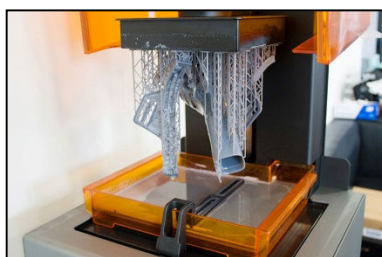


Рисунок 4 – SLA принтер

Существуют также инженерные филаменты для FDM печати, такие как ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол), нейлон (полиамид) или поликарбонат (PC), обеспечивающие лучшую адгезию и механические свойства. Однако они имеют значительную усадку – до 1–2% для ABS и 1,5–3% для нейлона что обязывает использовать принтеры с термокамерой для предотвращения деформаций и отлипания от платформы. Стоимость таких филаментов в 1,5–3 раза выше базовых, а печать требует оптимизации параметров, включая температуру сопла (220–260°C) и платформы (80–110°C).

Основная часть. Для повышения однородности свойств предлагается использовать термическую обработку – отжиг. Этот процесс включает нагрев детали до температуры ниже точки плавления, но выше температуры стеклования, что способствует диффузии полимерных цепей, релаксации внутренних напряжений и увеличению степени кристалличности в полукристаллических полимерах [2]. В результате слои лучше спекаются друг с другом, площадь контакта между ними возрастает, а анизотропия снижается. Для поддержания формы модели во время отжига, когда полимер размягчается, деталь окружают термостойким мелкодисперсным порошком (например, поваренной солью с зернистостью 0,1–0,5 мм) или гипсом, который предотвращает деформацию под действием гравитации. Степень шероховатости поверхности после отжига определяется зернистостью порошка: более мелкий дает гладкую финишную отделку. Кроме того, отжигаемая деталь должна быть напечатана с 100% заполнением, чтобы обеспечить монолитность структуры. Это позволяет получать прочные изделия из дешевых термопластов, таких как PLA или PETG, даже на открытых FDM-принтерах без термокамеры.

Были проведены испытания образцов на разрывной машине. Для испытания использовались стандартные образцы по ГОСТ 33693-2015, напечатанные с ориентацией слоев перпендикулярно оси растяжения. Сначала испытан необработанный образец из PETG: его диаграмма растяжения показывает максимальное усилие около 180 Н при удлинении 0,05 см, с хрупким разрушением из-за слабой межслойной адгезии (рисунок 5).

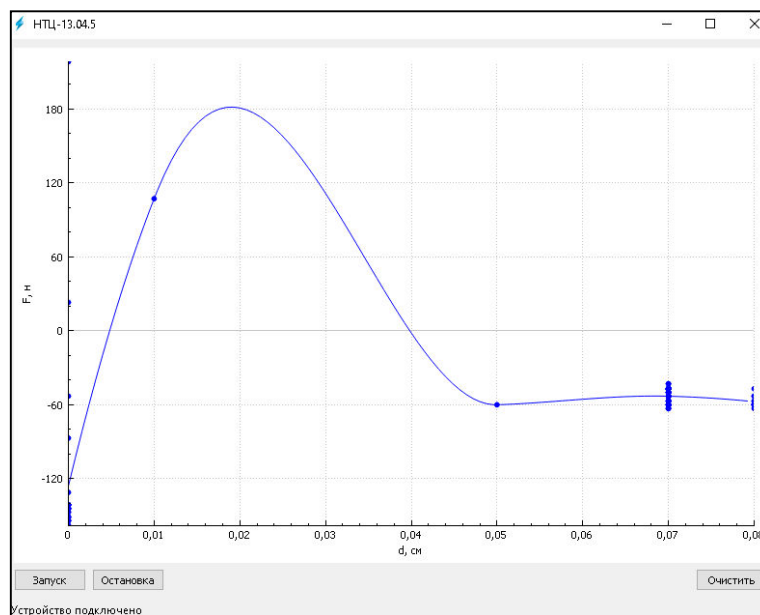


Рисунок 5 – Диаграмма растяжения необработанного образца

Затем проведены испытания образца, прошедшего отжиг при температуре 180°C в течение 25 минут в порошковой среде. Диаграмма показывает значительное улучшение: максимальное усилие превысило 600 Н при удлинении 0,13 см (рисунок 6).

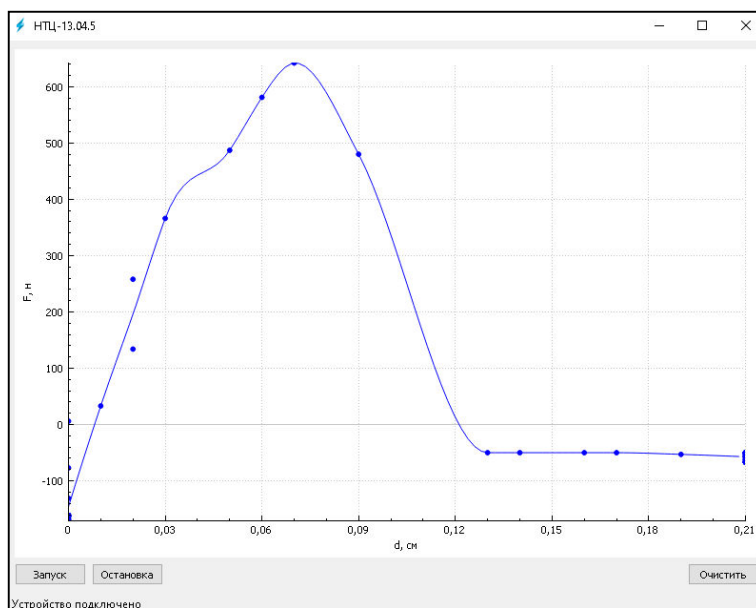


Рисунок 6 – Диаграмма растяжения модифицированного образца

Результаты объясняются тем, что площадь контакта между слоями значительно увеличилась [3]. Это можно заметить, анализируя поперечные разрезы образцов представленные на фото ниже (рисунок 6,7).

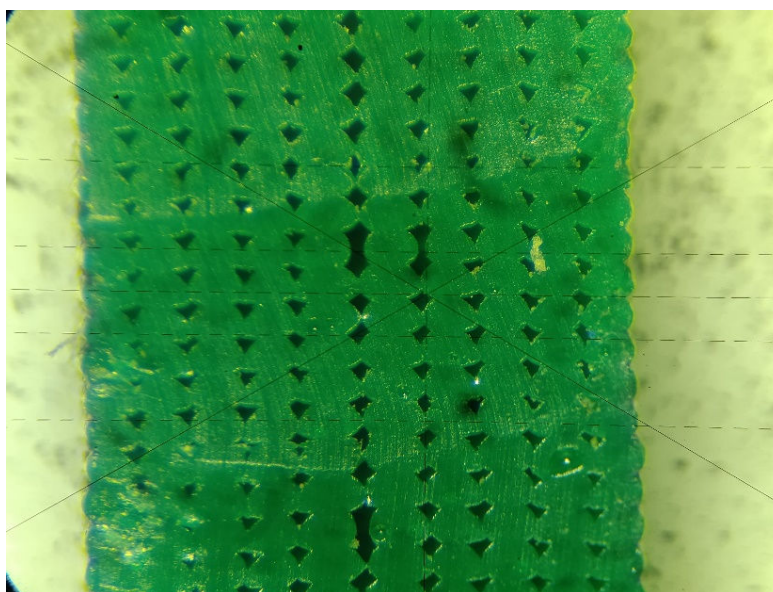


Рисунок 7 – большое количество полостей в необработанном образце

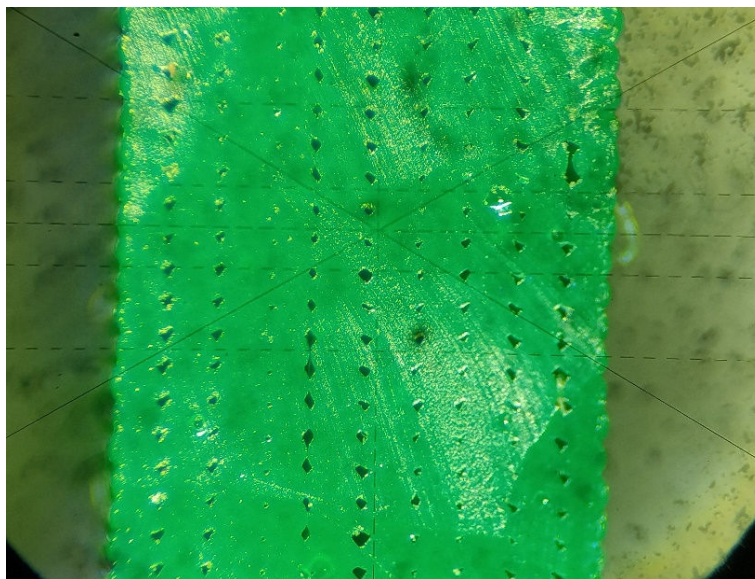


Рисунок 8 – полости стали значительно меньше

Заключение. Экономическое и техническое преимущество предлагаемой технологии заключается в минимизации затрат: для изготовления пластиковых деталей требуется лишь доступный 3D-принтер (открытый FDM-тип), способный печатать детали практически любой геометрии, и простые устройства для отжига – печь с контролем температуры, пресс для уплотнения порошка или вибрационный стол для равномерного распределения жидкого гипса. В отличие от литья под давлением, где необходимы проектирование и изготовление форм на фрезерных станках с ЧПУ, а также термопластавтоматы для впрыска под высоким давлением (до 100–200 МПа), данный метод значительно снижает стоимость изготовления.

Список литературы

1. Levenhagen, N. P. Bimodal molecular weight samples improve the isotropy of 3D printed polymeric samples / N. P. Levenhagen, M. D. Dadmun // *Polymer*. – 2017. – Vol. 122. – P. 232-241.
2. Garcia, R. A. Enhancing Mechanical Properties of Polymer 3D Printed Parts / R. A. Garcia, R. E. Steirer, J. L. Sanchez [et al.] // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13, № 4. – Article 562. – DOI: 10.3390/polym13040562.
3. Dawoud, M. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques / M. Dawoud, I. Taha, S. J. Ebeid // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2016. – Vol. 21. – P. 39-45.

UDC 621.78

TECHNOLOGY FOR MODIFICATION OF PARTS MANUFACTURED ON A 3D PRINTER

D. Yushko

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

G. Shakhlevich — Associate Professor, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department ETT

Annotation. The article discusses a technology for modifying parts manufactured by Fused Deposition Modeling (FDM) on 3D printers to reduce the anisotropy of mechanical properties and increase overall strength. The proposed approach includes heat treatment (annealing) in a controlled medium to improve interlayer adhesion and polymer crystallization. Experiments on samples made of glycol-modified polyethylene terephthalate (PETG) demonstrate a significant increase in tensile strength – up to a threefold increase compared to untreated parts. The method allows the use of affordable open-frame 3D printers without a heated chamber, minimizing equipment costs.

Keywords. D printing, FDM technology, anisotropy, annealing, glycol-modified polyethylene terephthalate (PETG), interlayer adhesion, mechanical properties, thermoplastics.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ ПРИ МОНТАЖЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Рахлин М.Е.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Ланин В.Л. – д-р техн. наук., профессор кафедры ЭТТ

Аннотация. Экспериментально исследовано влияние параметров контактной микросварки на качество сварного соединения. Установлено, что увеличение напряжения и длительности импульса повышает прочность, но ведет к прожогам. Предложена методика выбора оптимальных режимов сварки, минимизирующих дефекты.

Ключевые слова: микросварка, контактная сварка, метод расщепленного электрода

Введение. Непрерывная миниатюризация электронных компонентов и повышение плотности монтажа современных радиоэлектронных средств предъявляют все более жесткие требования к технологиям соединения материалов. Соединения в микросборках, гибридных интегральных схемах и микроэлектромеханических системах (МЭМС) должны обладать высокой надежностью, стабильным электрическим сопротивлением и минимальным тепловым воздействием на чувствительные элементы, что делает традиционные методы пайки неприемлемыми. В этой связи контактная микросварка, как один из основных методов получения неразъемных соединений, играет ключевую роль в обеспечении качества и долговечности микроэлектронной аппаратуры.

В работе проведено исследование основных технологических параметров контактной микросварки: напряжения на электроде и времени на прочность сварных соединений.

Основная часть. При производстве микроэлектронных устройств технология соединения компонентов должна соответствовать ряду жестких требований, обусловленных миниатюрностью элементов и чувствительностью структур к внешним воздействиям. К числу основных критериев, предъявляемых к процессам монтажа микросхем, относятся: обеспечение прочности контакта, сопоставимой с прочностью самих соединяемых элементов; минимизация переходного омического сопротивления в зоне соединения; использование щадящих режимов (минимально возможные температура, давление и время воздействия) для исключения повреждения полупроводниковых структур; технологическая гибкость – возможность соединения различных материалов и геометрических размеров; коррозионная безопасность (отсутствие остаточных материалов, способных инициировать коррозию);

В основе процесса контактной сварки лежит принцип подачи регулируемого по амплитуде и длительности переменного напряжения прямоугольной формы на сварочные электроды, которые контактируют с привариваемым проводником. Протекающий ток через цепь: электрод-проводник-подложка-электрод вызывает локальный разогрев контактирующих поверхностей, чем обеспечивается присоединение свариваемых материалов.

Напряжение на электродах для выбранного режима поддерживается во время сварки постоянным ввиду низкого выходного сопротивления блока контактной сварки. Сварочный ток зависит от переходного сопротивления электрод-проволока, проволока-контактная площадка. В процессе эксплуатации сопротивление рабочих поверхностей электродов вырастает за счет постепенного окисления. Это приводит к уменьшению сварочного тока и соответственно к уменьшению энергии, выделяемой в зоне сварки.

Экспериментальная часть. Проведены исследования процессов микросварки методом расщепленного электрода с целью определения оптимальных режимов сварки. отрезков никелевых лент на макетном устройстве, состоящем из сварочной системы установки для контактной сварки НТ-1020 и адгезиометра (рисунок 1).



Рисунок 1 – Установка контактной микросварки НТ-1020

Предварительно очищенные никелевые ленты закреплялась на предметном столике. Края лент прижимались друг к другу расщепленным электродом ЭК-1 и производилась сварка. После окончания сварки определялась механическая прочность сварного соединения. Получено три оптимальных режима сварки, которые приведены в таблице 1

Таблица 1 - Режимы сварки и их характеристики

№ режима	Длительность импульса, с	Напряжение, В	Ширина ленты, мм	Длина, см
1	0,2-0,28	105-125	0,8	2
2	0,32-0,36	120-135	0,9	2
3	0,4	135-150	1,2-1,3	2

Механическая прочность сварного соединения определялась до разрушения сварного соединения при помощи адгезиометра. Исследование зависимости прочности соединения от напряжения проводилось при получении соединений отрезков никелевой ленты друг с другом. Полученные экспериментальные зависимости показаны в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2 - Зависимость прочности сварных соединений при различных режимах сварки

№ режима	U, В	F, кгс
1 режим	105	0,8
	110	0,85
	120	0,9
	125	1,0
2 режим	120	1,5
	125	1,8
	130	2,0
	135	2,1
3 режим	135	2,0
	140	2,0
	145	2,15
	150	2,2

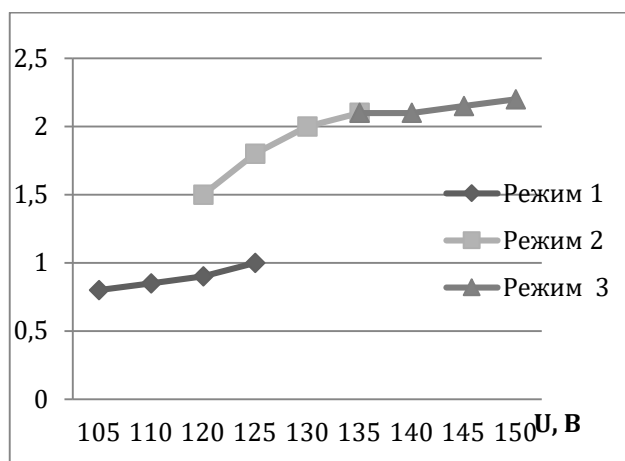


Рисунок 2 – Зависимость прочности соединения от напряжения сварки

Полученные экспериментальные зависимости показывают, что с увеличением напряжения и времени импульса механическая прочность возрастает, но вместе с этим возрастает и частота прожогов материала, что приводит к ухудшению производительности процесса и перерасходу материала.

Заключение. В ходе экспериментального исследования были выявлены основные дефекты сварки и причины их возникновения: прожоги сварного соединения по причинам больших усилий прижима, времени сварки, сварочного тока и износа рабочей части инструмента. Низкая прочность соединений наблюдалась при неправильном подборе материала электродов, низком усилии прижима, малых сварочном токе или времени сварки и при загрязнении рабочей части инструмента.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы относительно области применения контактной микросварки методом расщепленного электрода: для присоединения проволок в диапазоне диаметров (50 – 100) мкм, лент сечением (50–100) мкм х 200 мкм одноточечным присоединением электродом типа ЭК 2; внешних выводов корпусов при монтаже микросхем на платы и подложки.

Список литературы

1. Шмаков, М. Микросварка при производстве микросборок и гибридных интегральных микросхем / М. Шмаков // Технологии в электронной промышленности – 2006. №5. – С. 64-68.
2. Емельянов, В.Е. Технология электрических соединений в производстве электронной аппаратуры / В.Е. Емельянов, В.Л. Ланин, А.А. Хмыль. – Минск: Бестпринт, 1997. – 113с.
3. Онегин, Е.Е. Автоматическая сборка ИС / Е.Е. Онегин, В.В. Зенькович, Л.Г. Битно. – Минск: Выш. школа, 1990. – 383 с.

UDC 621.382.049.77:621.791.16

STUDY OF THE PROCESS OF CONTACT MICROWELDING IN THE ASSEMBLY OF MICROELECTRONIC DEVICES

Rakhlin M. Ye.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Lanin V.L. – Dr. of.Sci., professor of the department of EET

Annotation. The influence of resistance microwelding parameters on the quality of welded joints was experimentally studied. It was found that increasing voltage and pulse duration improves strength but leads to burn-through. A method for selecting optimal welding modes that minimize defects is proposed.

Keywords: microwelding, contact welding, split-electrode method

АНАЛИЗ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЖЕВАТЕЛЬНЫХ МЫШЦ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ СТИМУЛЯЦИИ ИМПУЛЬСНЫМИ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

Круглик Е. В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Самуйлов И.В. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. В работе исследуется влияние однократного сеанса импульсной магнитной стимуляции на биоэлектрическую активность жевательных и височных мышц. Проведен анализ электромиограмм (ЭМГ), зарегистрированных до и после воздействия импульсного магнитного поля (ИМП). Выявлено увеличение корреляции сигналов с парных мышц, что свидетельствует о нормализации нейромоторного контроля. Описана методика регистрации и обработки данных с использованием электронейромиографа «Мицар-ЭЭГ-10/70-201».

Ключевые слова: жевательные мышцы, височная мышца, электромиография, импульсная магнитная стимуляция, биоэлектрическая активность, нейромоторный контроль

Введение. Исследование биоэлектрической активности жевательных мышц представляет собой важное направление в нейрофизиологии и медицине, поскольку состояние этих мышц отражает не только локальную двигательную функцию, но и общее взаимодействие между нервной и мышечной системами. Биоэлектрическая активность этих мышц, отражающая процессы генерации и распространения потенциалов действия, может быть объективно оценена с помощью метода поверхностной электромиографии (ЭМГ) [1]. Данный метод является важным диагностическим инструментом, позволяющим выявлять характерные изменения амплитудных и частотных параметров ЭМГ-сигналов при различных патологиях. Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью разработки новых методов функциональной диагностики и терапии нарушений жевательных функций, основанных на воздействии физическими факторами [2].

Основная часть. Целью работы является анализ изменений биоэлектрической активности жевательных и височных мышц до и после воздействия импульсного магнитного поля. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: реализовать методику регистрации и обработки ЭМГ-сигналов, проанализировать полученные данные на предмет выявления закономерностей в изменении мышечной активности под воздействием магнитной стимуляции.

Для получения ЭМГ-сигналов использовался электроэнцефалограф «Мицар-ЭЭГ-10/70-201», который применялся в режиме регистрации миографических сигналов. Методика съёма данных включала несколько этапов. Первоначально производилась настройка электроэнцефалографа: фильтр верхней частоты выставлялся равным 0,16 Гц; фильтр нижней частоты – 30 Гц; режекторный фильтр «50 Гц»; чувствительность 15 мкВ/см; скорость развертки 60 мм/с.

Система настраивалась таким образом, чтобы расположить по 2 электрода на жевательной и 2 электрода на височной мышцах с каждой стороны головы. Поверхностные электроды устанавливались на область височной впадины на мышцу Temporalis и на мышцу Masseter. Для лучшей передачи данных на электроды перед установкой наносился медицинский гель. После установки электродов контролировался уровень импеданса, который не должен был превышать 10 кОм. При необходимости производилась переустановка электродов для достижения качественного контакта.

Протокол регистрации включал запись ЭМГ в состоянии покоя с открытыми глазами, в состоянии покоя с закрытыми глазами, а также при функциональной пробе (сжатие и разжимание челюсти). После проведения регистрации производилась стимуляция импульсным магнитным полем. Для этого подготавливался аппарат транскраниальной магнитной стимуляции с кольцевым индуктором. Длительность процедуры составляла 1 минуту, частота импульсов 12 Гц, скважность между импульсами – 0 секунд. Мощность сигнала выставлялась индивидуально для пациента (в диапазоне 11-14%). Стимуляция

проводилась последовательно с правой, затем с левой стороны лица. Сразу после завершения стимуляции производилось повторное подключение электродов и регистрация ЭМГ по той же методике.

Математическая обработка данных выполнялась в среде MATLAB. Анализировались два ключевых параметра: коэффициент корреляции Пирсона между сигналами с парных жевательных мышц (показатель синхронности работы), а также изменения спектра мощности сигнала.

В ходе анализа полученных данных были выявлены следующие закономерности. До стимуляции левая и правая жевательные мышцы работали более независимо. После проведения стимуляции импульсными магнитными полями был зафиксирован рост корреляции их электрической активности на 0,00625. Данный показатель указывает на слабую тенденцию к увеличению синхронности работы мышечных групп.

Анализ спектра мощности ЭМГ-сигнала показал, что изменения оказались незначительными. На некоторых участках частотного спектра наблюдались локальные сдвиги мощности, не превышающие 4 дБ/Гц. Это означает, что общая энергетика сигнала осталась стабильной, то есть не произошло резкого усиления или ослабления общей мышечной активности. Сдвиги на 4 дБ/Гц в отдельных частотных диапазонах указывают на возможную перенастройку узких частей мышечной активации, но не о полном изменении режима работы мышцы.

Также значимым результатом проведенного исследования является увеличение межсторонней кросс-корреляции электромиографических сигналов после воздействия импульсным магнитным полем. Кросскорреляционный анализ позволяет оценить степень сходства и синхронности двух сигналов. Применительно к жевательной мускулатуре, показатель кросс-корреляции между сигналами, зарегистрированными с правой и левой жевательных мышц, отражает степень скоординированности их работы в процессе выполнения функции.

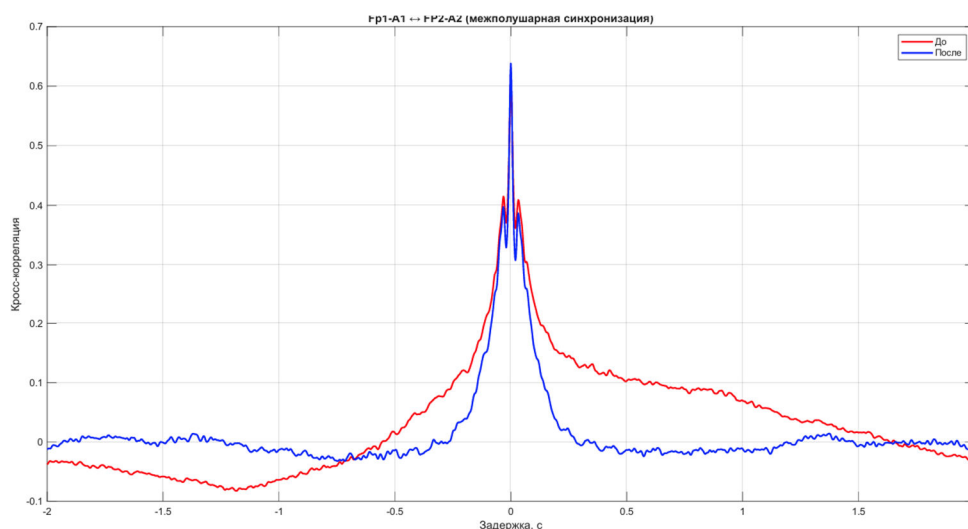


Рисунок 1 – Межсторонняя кросс-корреляция.

Таким образом, эффект стимуляции проявился в большей степени в синхронизации, чем в усилении активации, а также носит более индивидуальный характер. Основным результатом заключается в улучшении координации между мышцами. Незначительные изменения в спектре мощности при росте корреляции свидетельствуют о том, что стимуляция в первую очередь повлияла на координационный, а не на энергетический аспект работы жевательной мускулатуры. Это может говорить о нормализации нейромоторного контроля без существенного изменения общего мышечного тонуса.

Практическая значимость результатов:

1 Подтверждают эффективность однократного воздействия ИМП (аппарат «Нейро МС-Д» с параметрами 12 Гц, 60 сек, индивидуальной мощности (11-14%)) для быстрой модуляции функционального состояния жевательных мышц.

2 Предлагают объективные нейрофизиологические маркеры для оценки немедленного эффекта стимуляции – рост межканальной корреляции ЭМГ.

3 Обосновывают перспективность применения методики в комплексной реабилитации пациентов с дисфункцией ВНС, миофасциальным болевым синдромом, последствиями неврологических нарушений, а также для мониторинга эффективности лечения.

Заключение. В рамках проведенного исследования был выполнен анализ влияния однократного сеанса импульсной магнитной стимуляции на биоэлектрическую активность жевательной и височной мускулатуры. Регистрация поверхностной электромиографии до и после воздействия позволила выявить характерные изменения.

Подтверждено нормализующее влияние ИМП на координацию мышц. Ключевым результатом является увеличение коэффициента корреляции Пирсона между сигналами с парных жевательных мышц после стимуляции. Это прямо указывает на повышение синхронности и скоординированности их работы. Данный эффект согласуется с теоретическими положениями о действии ИМП на нейромоторный контроль и соответствует клинической цели – восстановлению баланса и кооперации в работе мышечного аппарата.

Выявлена избирательность эффекта стимуляции. Незначительные изменения в спектре мощности ЭМГ-сигнала при выраженном росте межмышечной корреляции позволяют сделать вывод о преимущественном влиянии ИМП на координационный аспект мышечной функции. Стимуляция привела к оптимизации паттерна нейромоторной активации без существенного изменения общего уровня мышечного тонуса.

Практическая значимость результатов заключается в подтверждении эффективности однократного воздействия ИМП для быстрой модуляции функционального состояния жевательных мышц. Обоснована перспективность применения методики в комплексной реабилитации пациентов с дисфункцией ВНС, последствиями неврологических нарушений, а также для мониторинга эффективности лечения.

Список литературы

1. Зименко, К.А. Анализ и обработка сигналов электромиограммы / К.А. Зименко, Л.С. Боргуль, Л.Л. Маргун // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 1(83). – С. 41-43.
2. Niedermeyer, E. *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields* / E. Niedermeyer, F.L. da Silva. – 6th ed. – Lippincott Williams & Wilkins, 2011. – 864 с.
3. Rossini, P.M. *Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord, roots and peripheral nerves: Basic principles and procedures for routine clinical and research application. An updated report from an I.F.C.N. Committee* / P.M. Rossini, D. Burke, R. Chen et al. // *Clinical Neurophysiology*. – 2015. – № 6. – С. 1071-1107.
4. Beaulieu, C. *Effects of repetitive peripheral magnetic stimulation on normal or impaired motor control. A review* / C. Beaulieu, C. Schneider // *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*. – 2013. – № 4. – С. 251-260.

UDC 612.741.16:616.742.71:615.847.8

ANALYSIS OF BIOELECTRIC ACTIVITY OF MASTICATORY MUSCLES AFTER STIMULATION BY PULSED MAGNETIC FIELDS

Kruglik E. V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Samuilov I.V. – Senior Lecturer at the Department of ETT

Annotation. The paper examines the effect of a single session of pulsed magnetic stimulation on the bioelectric activity of the masticatory and temporal muscles. The analysis of electromyograms (EMG) recorded before and after exposure to a pulsed magnetic field (IMF) is carried out. An increase in the correlation of signals from paired muscles was revealed, which indicates the normalization of neuromotor control. A method for recording and processing data using the Micar-EEG-10/70-201 electroneuromyograph is described.

Keywords: masticatory muscles, temporal muscle, electromyography, pulsed magnetic stimulation, bioelectric activity, neuromotor control

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА ВОЗДУХА

Даревский Т.Д.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Самуйлов И.В. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. Исследован ультразвуковой метод измерения потока воздуха в медицинских спирометрах на основе принципа времени пролёта (transit-time) с V-образной конфигурацией датчиков. На основании анализа литературных источников показано, что метод обеспечивает высокую точность ($\pm 2\%$), воспроизводимость, отсутствие калибровки и гигиеничность (на примерах TrueFlow™ и SharpFlow)

Ключевые слова: ультразвуковая спирометрия, время пролёта, transit-time, спирометрия, поток воздуха, функция внешнего дыхания

Введение. Измерение респираторного потока – критическая задача в пульмонологии, реаниматологии, анестезиологии и функциональной диагностике дыхания. Среди методов мониторинга всё популярнее становится ультразвуковой бесконтактный способ.

Ультразвуковой спирометрией называют определение скорости и объема дыхания по изменению времени прохождения импульсов вдоль и против потока (transit-time) или по доплеровскому сдвигу от микрочастиц. В большинстве медицинских спирометров применяется времяпролетный принцип: пара датчиков под углом к дыхательному каналу поочередно излучает и принимает сигналы. Разность времени прохождения пропорциональна скорости воздушной струи, по которой рассчитываются ключевые показатели функции внешнего дыхания.[1]

Цель работы – проанализировать преимущества и ограничения ультразвукового метода времени пролёта с диагональной конфигурацией датчиков на примере современных медицинских спирометров.

Основная часть. Принцип определения потока воздуха с помощью ультразвукового датчика. В основе ультразвуковых датчиков расхода газа лежит использование звуковых волн для измерения скорости газа. Основной метод основан на принципе времени прохождения сигнала, при котором ультразвуковые преобразователи (датчики) излучают импульсы, распространяющиеся в потоке газа. Два преобразователя располагаются таким образом, что один посылает сигналы вниз по потоку (по направлению потока), а другой – вверх по потоку (против направления потока). Разница во времени (Δt) между этими путями пропорциональна скорости газа (V) и рассчитывается по следующей формуле:

$$V = \frac{L \cdot \Delta t}{2 \cdot t_0}, \quad (1)$$

где L – длина пути, а t_0 – среднее время прохождения. Затем объемный расход рассчитывается путем умножения на площадь поперечного сечения трубы. [2]

Другой вариант – эффект Доплера, при котором волны отражаются от пузырьков или частиц в газе, а сдвиг частоты указывает на скорость – идеальную для газов, содержащих примеси. В усовершенствованных моделях для прямой передачи используются сдвиговые волны или волны Лэмба, которые вызывают резонанс стенки трубы для усиления сигналов в газах низкого давления или затухающих газах. Многоканальные конфигурации (например, 4 или 6 путей) усредняют измерения по всей трубе для обработки турбулентных или асимметричных потоков, повышая точность. На этой диаграмме показана схема измерения времени прохождения, демонстрирующая, как сигналы до и после трубы различаются в зависимости от потока.

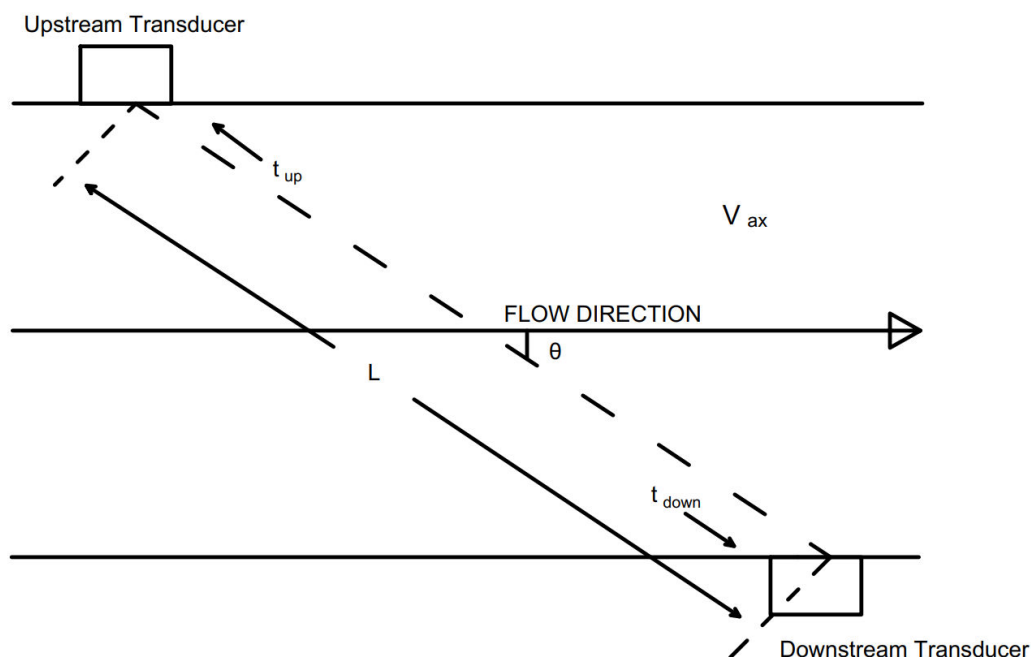


Рисунок 1 – Схема принципа работы ультразвукового датчика

В медицинских спирометрах, чаще применяется V-образная конфигурация (V-mount), где оба ультразвуковых преобразователя расположены на одной стороне канала, а сигнал отражается от противоположной стенки. Это обеспечивает компактность конструкции и лучшее усреднение профиля потока. Такая схема (V-traverse) позволяет использовать более короткий и удобный для размещения путь ультразвукового луча, что особенно важно в портативных и клинических приборах с небольшим диаметром дыхательного пути. Кроме того, отражение от стенки помогает компенсировать неравномерность скоростного профиля потока воздуха (ламинарный/турбулентный режим), повышая точность измерения объёмной скорости и интегральных показателей (например, ОФВ₁ и ЖЕЛ) даже при неидеальной геометрии потока.[3]

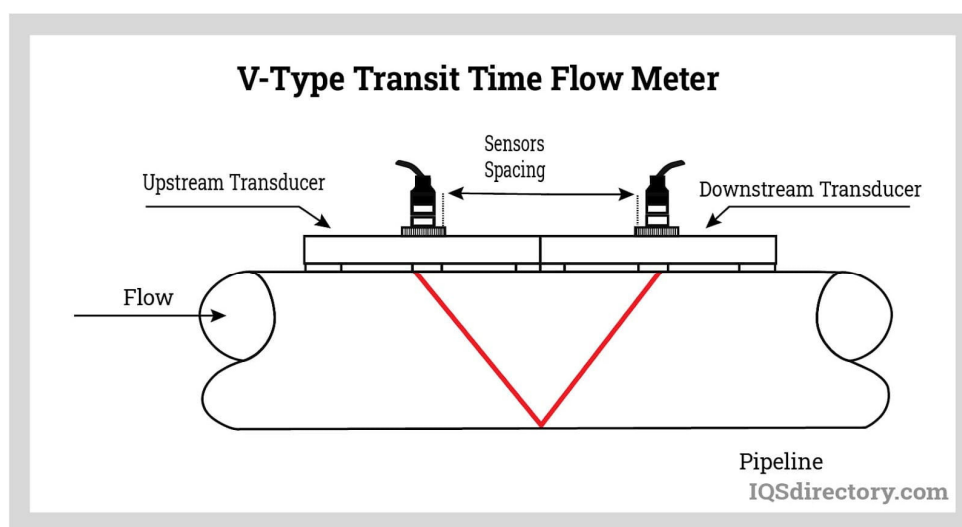


Рисунок 2 – Схема ультразвукового расходомера времени пролёта V-типа.[3]

Существуют специализированные ультразвуковые датчики, разработанные для медицинской спирометрии.

TrueFlow™ (ndd Medical Technologies) – ультразвуковой датчик на основе времени пролёта (transit-time), с открытым каналом без сопротивления и механических частей. Обеспечивает точность потока $\pm 2\%$ или ± 0.020 л/с (в зависимости от модели), объёма $\pm 2\%$ или ± 0.050 л, диапазон ± 16 л/с, не требует калибровки в течение всего срока службы, устойчив к влиянию температуры, влажности и состава газа.[4]

SharpFlow (GANSORN / Schiller) – высокоточный ультразвуковой датчик с прямым цифровым измерением времени прохождения импульсов. Характеризуется точностью потока $\pm 2\%$ или ± 0.1 л/с, объёма $\pm 2\%$ или ± 0.05 л, диапазон ± 16 л/с, полная гигиеничность (открытый канал), отсутствие необходимости в калибровке и высокая воспроизводимость результатов даже при турбулентных потоках.[5]

Закключение. Выполнен анализ ультразвукового метода определения потока воздуха, применяемого в современных медицинских спирометрических системах преимущественно на основе принципа времени пролёта с V-образной конфигурацией датчиков.

Установлено, что данный метод обеспечивает высокую точность ($\pm 2\%$ или $\pm 0,020$ – $0,1$ л/с по потоку и $\pm 2\%$ или $\pm 0,05$ л по объёму), отличную воспроизводимость результатов, отсутствие необходимости в калибровке в течение всего срока службы, а также устойчивость к вариациям температуры, влажности и состава газовой смеси. Благодаря открытому измерительному каналу без движущихся частей и сопротивления потоку достигается полная гигиеничность и комфорт пациента. Эти характеристики особенно ярко проявляются в системах TrueFlow™ (ndd Medical Technologies) и SharpFlow (GANSORN / Schiller), что делает ультразвуковую спирометрию одним из наиболее надёжных и перспективных методов функциональной диагностики внешнего дыхания.

Вместе с тем определено, что турбулентные режимы потока (при высоких скоростях или асимметричном профиле) и загрязнение канала (конденсат, аэрозоли, микрочастицы) приводят к искажению временных параметров сигнала, нарушению усреднения профиля скорости и, как следствие, к снижению достоверности ключевых показателей функции внешнего дыхания.

Список литературы

1. Принцип работы ультразвукового расходомера. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meterflow.ru>
2. Ультразвуковой датчик расхода газа: принцип работы, конструкция и области применения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.flowmeter.com>
3. Ультразвуковые расходомеры: типы и области применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iqsdirectory.com>
4. Технология TrueFlow – как она работает [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nddmed.com>.
5. Технология SharpFlow [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ganshorn-medical.com>.

UDC 621.3.049.77–048.24:537.2

ULTRASONIC METHOD FOR DETERMINING AIR FLOW

Darevsky T.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Samoilov I.V.. – Senior Lecturer of the Department of Electronic Technology

Annotation. An ultrasonic method for measuring airflow in medical spirometers based on the transit-time principle with a V-shaped sensor configuration was investigated. A literature review demonstrated that the method provides high accuracy ($\pm 2\%$), reproducibility, lack of calibration, and hygiene (using TrueFlow™ and SharpFlow as examples).

Key words: ultrasound flowmetry, time of flight, transit-time, spirometry, air flow, respiratory function

МЕТОДИКА ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ЭМГ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЖЕВАТЕЛЬНОЙ МЫШЦЫ

Швед И.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Самуйлов И.В. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. В статье представлена разработка программного модуля для временного анализа электромиографических (ЭМГ) сигналов в среде *Python*. Созданный программный инструмент позволяет автоматизировать процессы обработки, визуализации и анализа ЭМГ-сигналов, полученных от жевательной и височной мышцы при стандартизированном тесте на сжатие зубов. В работе рассмотрены особенности анатомии исследуемых мышц, методы электромиографии, основные подходы к анализу сигналов во временной области.

Ключевые слова: электромиография, *Python*, временной анализ, жевательная мышца.

Введение. Электромиография (ЭМГ) – наиболее объективный и надежный метод визуализации функций и эффективности работы мышц, основанный на регистрации их электрических потенциалов. При глобальной поверхностной электромиографии (*sEMG*) поверхностные электроды располагаются на поверхности кожи и регистрируют наложенные друг на друга потенциалы действия двигательных единиц, исходящие от множества мышечных волокон [1]. Электромиографию можно использовать как для диагностики, так и для лечения, чтобы регистрировать нервно-мышечную активность [2]. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью создания доступного и гибкого модуля в среде *Python* для обработки данных, полученных в ходе стандартизированного теста на сжатие зубов.

Основная часть. Исследование проводилось с использованием системы поверхностной электромиографии. Сигналы регистрировались с контролируемых зон височной и жевательной мышц при выполнении теста на сжатие зубов. Частота дискретизации составляла 2 кГц. На этапе обработки реализован алгоритм выделения фаз движения: покой, сжатие, удержание и расслабление. Переход между фазами определялся по временным меткам ($k1$, $k2$, $k3$, $k4$), которые отмечали границы фаз движения. Далее сигнал преобразуется в микровольты и подвергается фильтрации. На рисунке 1 представлен пример ЭМГ парных жевательных мышц.

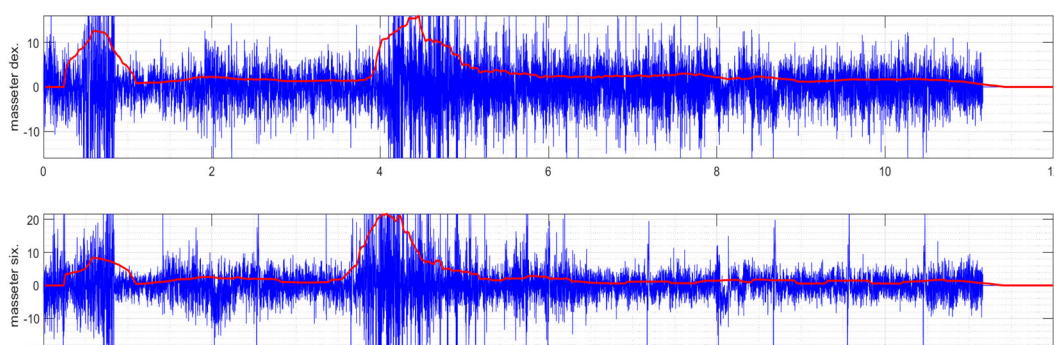


Рисунок 1 – ЭМГ парных жевательных мышц

Ключевым алгоритмом является построение огибающей ЭМГ-сигнала с помощью преобразования Гильберта. Полученная полная огибающая точно повторяет форму сигнала, после чего применяется процедура адаптивной децимации на неперекрывающихся окнах (50–100 мс) для выделения максимальных значений амплитуды. На рисунке 2 представлен пример исходного сигнала и максимумы его огибающей для левой жевательной мышцы.



Рисунок 2 – Сигнал с максимальными значениями огибающей Гильберта для левой жевательной мышцы

Далее, с использованием меток `'border'` и данных покоя, модуль автоматически детектирует контрольные точки $K1-K4$ для каждого жевательного цикла. Алгоритм динамически вычисляет порог на основе среднего и стандартного отклонения фоновой активности (`'relax'`), что обеспечивает адаптивность к индивидуальным особенностям сигнала. Для каждой из пяти фаз (покой1, сжатие, удержание, расслабление, покой) вычисляются статистические параметры: средняя амплитуда, СКО, медиана, размах «пик-пик».

Обработка ЭМГ-данных показала закономерное распределение активности по фазам жевательного цикла: резкий рост амплитуды при сжатии, стабильное плато в фазе удержания и постепенное снижение при расслаблении. У более 30 % испытуемых наблюдалась межсторонняя асимметрия, что свидетельствует о неравномерности мышечной активности и возможной функциональной перегрузке одной стороны.

Закключение. Предложенная методика временного анализа ЭМГ-сигналов позволяет проводить количественную оценку функционального состояния жевательной мышцы на основе параметров временной области. Разработанный программный модуль *Python* обеспечивает автоматизацию этапов обработки, расчёт амплитудных характеристик и визуализацию фаз цикла жевания. Применённый подход может быть использован при функциональной диагностике височно-нижнечелюстного сустава, планировании ортодонтического лечения и в реабилитационных исследованиях.

Список литературы

1. Szyszka-Sommerfeld, L. Surface Electromyography as a Method for Diagnosing Muscle Function in Patients with Congenital Maxillofacial Abnormalities / L. Szyszka-Sommerfeld, M. Lipski, K. Woźniak // *Journal of Healthcare Engineering*. 2020. No 1–6. DOI: 10.1155/2020/8846920.
2. Nishi SE, Basri R, Alam MK. Uses of electromyography in dentistry: An overview with meta-analysis. *Eur J Dent*. 2016 Jul-Sep;10(3):419-425. DOI: 10.4103/1305-7456.184156.

UDC 616.831.9-073.97

METHODOLOGY OF TIME-DOMAIN EMG ANALYSIS FOR ASSESSING FUNCTIONAL STATE ON THE EXAMPLE OF THE MASSETER MUSCLE

Shved I.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Samuilau I. U. – Senior Lecturer at the Department of Electronic Engineering and Technology

Annotation. The article presents the development of a software module for the time-domain analysis of electromyographic (EMG) signals in the Python environment. The created software tool allows to automate the processes of processing, visualization and analysis of EMG signals obtained from the masseter and temporal muscles in a standardized test for teeth compression. The paper discusses the features of the anatomy of the studied muscles, the methods of electromyography, the main approaches to the analysis of signals in the time domain.

Keywords: electromyography, Python, time-domain analysis, masseter muscle.

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ НИЖНЕЙ ЧЕЛЮСТИ И ШЕЙНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Горбачёв А. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Самуйлов И.В. – ст. преподаватель ЭТТ

Аннотация. В статье представлены результаты статистического исследования морфометрических параметров челюстно-лицевой области и шейного отдела позвоночника. На основе анализа данных конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ) выявлены закономерности распределения плотности костной ткани и геометрической асимметрии суставных структур. Установлены статистически значимые корреляции между положением нижней челюсти и отклонениями позвоночного столба. Результаты работы позволяют сформировать нормативные диапазоны и критические маркеры для объективной оценки патологических состояний в клинической практике.

Ключевые слова: нижняя челюсть, шейный отдел позвоночника, статистический анализ, КЛКТ, асимметрия, плотность костной ткани.

Введение. Современная диагностика зубочелюстных аномалий требует перехода от качественного описания снимков к количественному анализу больших массивов данных. Взаимосвязь между окклюзионными нарушениями и состоянием шейного отдела позвоночника давно отмечена клиницистами, однако отсутствие единых статистических стандартов затрудняет постановку диагноза. Конусно-лучевая компьютерная томография (КЛКТ) предоставляет необходимый объем цифровой информации для проведения глубокого статистического анализа, что делает актуальным поиск устойчивых закономерностей в строении и плотности костных структур для повышения точности медицинской диагностики и планирования лечения.

Основная часть. Методологическую основу данного исследования составил ретроспективный анализ серии снимков конусно-лучевой компьютерной томографии, обработанных в программном комплексе Galileos Viewer. Процесс исследования начался с формирования репрезентативной выборки и проведения прецизионных измерений ключевых антропометрических точек в трехмерном пространстве. В ходе работы детально изучались морфометрические показатели височно-нижнечелюстного сустава, включая ширину передней, верхней и задней суставных щелей. Статистическая обработка этих данных позволила выявить значительную вариабельность пространственного положения суставных головок, которая в ряде случаев напрямую коррелирует с латеральным смещением шейного отдела позвоночника относительно центральной оси [1,2].

Важным аспектом статистического анализа стало изучение плотности костной ткани в области мышечковых отростков нижней челюсти. При сопоставлении показателей в различных группах было установлено, что в группе условной нормы значения плотности значительно превышают аналогичные показатели у пациентов с признаками дегенеративных изменений. Статистически доказано, что снижение плотности до уровня 1300–1400 относительных единиц является достоверным признаком патологической перестройки кости, характерной для артроза. Кроме того, анализ фронтальных срезов позволил зафиксировать средние значения расстояний между головками суставов и выявить закономерности их изменения при различных типах прикуса, что подтверждается существенным разбросом линейных параметров зубного ряда в пределах от 20 до 33 миллиметров.

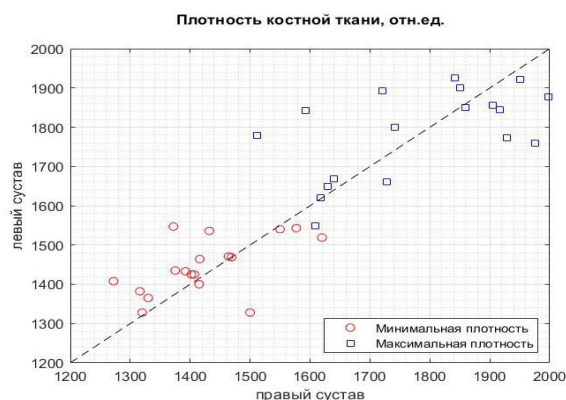


Рисунок 1 – Плотность костной ткани

Особое внимание в ходе исследования уделялось оценке достоверности и воспроизводимости полученных измерений. Статистический расчет погрешностей показал, что определение высоты мышечковых отростков является наиболее чувствительным к человеческому фактору этапом анализа, где вероятность ошибки может достигать критических значений. Это обстоятельство подчеркивает необходимость внедрения автоматизированных алгоритмов обработки для минимизации субъективности в клинических выводах. Выявленные в процессе анализа отклонения шейных позвонков от вертикали в совокупности с данными о плотности костной ткани позволяют сформировать многофакторную математическую модель состояния пациента. Такая модель служит надежной базой для разработки количественных критериев поддержки принятия решений в ортодонтической, ортопедической и вертебрологической практике [3].

Заключение. Проведенное статистическое исследование подтвердило наличие тесной связи между морфологическими параметрами нижней челюсти и пространственным положением шейного отдела позвоночника. Выявленные диапазоны плотности костной ткани и закономерности изменения суставных щелей позволяют объективизировать процесс выявления патологий на доклиническом этапе, обеспечивая переход от визуальной интерпретации снимков к доказательным числовым показателям.

Список литературы

1. Герасимова Л. П. Рентгенологическая диагностика мышечно-суставной дисфункции височно-нижнечелюстного сустава сочетанной с патологией шейного отдела позвоночника // Пародонтология. – 2023. – Т. 28, № 3. – С. 227–233.
2. Лучевая диагностика в стоматологии: практ. руководство / под ред. А. Ю. Васильева. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. – 284 с.
3. Лечение пациентов с расстройствами височно-нижнечелюстного сустава и жевательных мышц: клинические рекомендации / В. Н. Трезубов [и др.]. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021. – 90 с.

UDC 616.716.4-073.75:616.711.1

STUDY OF THE STATE OF THE LOWER JAW AND THE CERVICAL SPINE BASED ON STATISTICAL ANALYSIS

Gorbachev A. A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Samuilov I.V. – Senior Lecturer at the Department of ETT

Annotation. The article presents the results of a statistical study of the morphometric parameters of the maxillofacial region and the cervical spine. Based on the analysis of cone-beam computed tomography (CBCT) data, patterns of distribution of bone tissue density and geometric asymmetry of articular structures were revealed. Statistically significant correlations between the position of the lower jaw and deviations of the spinal column were established. The results of the work allow the formation of normative ranges and critical markers for an objective assessment of pathological conditions in clinical practice.

Keywords: lower jaw, cervical spine, statistical analysis, CBCT, asymmetry, bone density.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ

Ермакович М. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Самуйлов И.В. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. В работе проведен анализ частотно-пространственных характеристик биоэлектрической активности головного мозга на основе метода электроэнцефалографии (ЭЭГ). Рассмотрены основные ритмы (альфа, бета, тета, дельта), их функциональное значение и топографическое распределение. Исследованы современные подходы к мониторингу когнитивных функций и нейровизуализации. Обоснована важность анализа пространственной асимметрии и частотных паттернов для оценки функционального состояния центральной нервной системы.

Ключевые слова: биоэлектрическая активность, головной мозг, электроэнцефалография (ЭЭГ), частотные ритмы, пространственное распределение, нейровизуализация

Введение. Изучение биоэлектрической активности мозга является фундаментальной задачей современной нейрофизиологии и биомедицинской инженерии. Электроэнцефалография (ЭЭГ) остается одним из наиболее доступных и информативных методов исследования динамики нейронных процессов в реальном времени. Широкое применение микропроцессорной техники и алгоритмов цифровой обработки сигналов позволяет проводить глубокий анализ частотно-пространственного распределения потенциалов, что крайне важно для диагностики патологий, оценки когнитивной нагрузки и разработки интерфейсов «мозг-компьютер». Актуальность данной работы обусловлена необходимостью систематизации подходов к интерпретации ритмической активности мозга в зависимости от локализации электродов и функционального состояния субъекта.[1]

Основная часть. Изучение биоэлектрической активности мозга базируется на анализе суммарных потенциалов, возникающих в результате синаптической передачи сигналов между пирамидными нейронами коры. Основным методом регистрации данных процессов является электроэнцефалография (ЭЭГ). В состоянии спокойного бодрствования доминирующим компонентом спектра выступает альфа-ритм (8–13 Гц), тогда как бета-активность (13–30 Гц) ассоциируется с когнитивным напряжением и процессами активного внимания. Для коррекции функционального состояния и управления нейронной динамикой применяется транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС). Современные исследования подтверждают, что высокочастотное воздействие (10–12 Гц) способно модулировать мощность ритмов и снижать уровень психоэмоционального напряжения.[2]

Экспериментальное исследование проводилось на базе 16-канального цифрового электроэнцефалографа «Мицар-ЭЭГ-10/70-201». Регистрация сигналов осуществлялась по международной системе «10-20» с контролем импеданса на уровне ≤ 5 кОм. Протокол включал фоновую запись (открытые/закрытые глаза), выполнение когнитивной задачи (ментальная арифметика) и последующее воздействие ТМС частотой 12 Гц в течение 1 минуты с помощью аппарата «Нейро-МС-Д».[3]

Математическая обработка данных выполнялась в среде *MATLAB* методом Уэлча. В качестве ключевого параметра анализа использовалась медианная частота (*MF*), характеризующая частотный центр тяжести спектра мощности. Расчет производился для альфа- и бета-диапазонов на 40-секундных эпохах записи. Результаты анализа показали, что воздействие 12 Гц ТМС вызывает специфические частотно-пространственные перестройки. В состоянии с открытыми глазами наблюдалось повышение медианной частоты бета-ритма ($\Delta = +0,25$ Гц), преимущественно в правых лобно-центральных отделах (*F4*, *C4*, *P4*), что интерпретируется как усиление коркового тонуса и готовности к деятельности.

Наиболее значимые изменения зафиксированы в состоянии с закрытыми глазами: произошло статистически достоверное снижение медианной частоты бета-диапазона в

среднем на $0,84 \pm 0,21$ Гц ($p < 0,001$) по всем отведениям с акцентом в лобных зонах (Fz , Cz , $F3$, $F4$). При этом параметры альфа-ритма оставались относительно стабильными ($\Delta = -0,12$ Гц). Подобная динамика отражает переход центральной нервной системы к состоянию глубокой релаксации и эффективного торможения под влиянием внешней стимуляции.[2]

Анализ показал, что после ТМС-воздействия также снижается выраженность десинхронизации ритмов при когнитивной нагрузке, что свидетельствует об оптимизации энергетических ресурсов мозга и повышении стрессоустойчивости. Таким образом, параметр медианной частоты бета-ритма в состоянии покоя с закрытыми глазами является высокочувствительным объективным маркером для оценки эффективности нейромодуляции и оперативной коррекции стресс-ассоциированных состояний у студентов.

Заключение. В ходе научно-исследовательской работы изучены частотно-пространственные характеристики биоэлектрической активности мозга студентов при воздействии транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС) частотой 12 Гц. Разработанный протокол регистрации ЭЭГ с использованием системы «Мицар-ЭЭГ-10/70-201» и расчет медианной частоты спектра позволили объективно оценить динамику функционального состояния ЦНС. Установлено, что однократное воздействие ТМС вызывает статистически значимое снижение медианной частоты бета-ритма в состоянии покоя с закрытыми глазами (в среднем на 0,84 Гц), что свидетельствует об усилении процессов внутреннего торможения и нормализации психоэмоционального состояния.

Практическая значимость исследования заключается в подтверждении эффективности коротких протоколов альфа-диапазонной ТМС как метода оперативной коррекции стресс-ассоциированных состояний. Выявленные изменения медианной частоты бета-диапазона могут служить надежным диагностическим маркером для оценки функциональных резервов коры и уровня стрессоустойчивости. Полученные результаты создают методическую базу для внедрения подобных технологий в систему психофизиологической поддержки студентов в периоды повышенных учебных нагрузок.

Список литературы

1. *Neuroimaging of performance monitoring* / M. Ullsperger [и др.] // *NeuroImage*. – 2014. – Vol. 102, P. 2. – P. 358–369.
2. *Bazanov, O. M. Interpreting EEG alpha activity* / O. M. Bazanova, D. Vernon // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. – 2014. – Vol. 44. – P. 94–110.
3. *Мицар-ЭЭГ-10/70-201 Ambimed* [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ambimed.ru/product/elektroentsefalograf-mitsar-eeeg-10-70-201/?srsltid=AfmBOorA0Ng3V4Zx1XBxXFJDV6Ru4CXwCM_z5WSt-0hvoReDSvypNMZ4. Дата доступа: 26.02.2026

UDC 616-71:612.82

ASSESSMENT OF THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM STATE BASED ON SPATIAL-FREQUENCY ANALYSIS OF THE ELECTROENCEPHALOGRAM

Yermakovich M. A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Samuilov I.V. – Senior Lecturer at the Department of ETT

Annotation. The paper analyzes the frequency-spatial characteristics of the brain's bioelectrical activity based on the electroencephalography (EEG) method. It considers the main rhythms (alpha, beta, theta, delta), their functional significance, and topographical distribution. Modern approaches to monitoring cognitive functions and neuroimaging are investigated. The importance of analyzing spatial asymmetry and frequency patterns for assessing the functional state of the central nervous system is substantiated.

Keywords: bioelectrical activity, brain, electroencephalography (EEG), frequency rhythms, spatial distribution, neuroimaging

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛОВ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ИНТЕРФЕЙСАХ

Жук Е.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Собчук Н.С. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. Представлен учебный программный комплекс для наглядного изучения целостности сигналов в высокоскоростных цифровых интерфейсах. Реализованы линейные коды *NRZ*, манчестерский и *MLT-3*, упрощенная модель канала (белый шум, джиттер, *RC*-фильтрация) и построение глазковой диаграммы для оценки «закрытия глаза». Дополнительно выполнен расчет волнового сопротивления микрополосковой линии и стриплайна по формулам *IPC*. Параметры шума, джиттера и *RC*-постоянной могут изменяться пользователем, что позволяет проследить влияние искажений на раскрытие глаза.

Ключевые слова: целостность сигналов; высокоскоростные интерфейсы; линейное кодирование; глазковая диаграмма; джиттер; белый шум; *RC*-фильтрация; микрополосковая линия; стриплайн; волновое сопротивление.

Введение. Подобные эффекты характерны для интерфейсов *PCIe*, *USB*, *Ethernet* и др. Высокоскоростные цифровые интерфейсы предъявляют повышенные требования к целостности сигналов (*Signal Integrity, SI*): рост частоты и крутизны фронтов усиливает влияние паразитных параметров линий передачи и межсоединений. Это приводит к смещению момента переключения (джиттеру), деградации фронтов при ограничении полосы и амплитудным искажениям вследствие шумов. Цель работы – разработка учебного программного комплекса, объединяющего генерацию сигналов, упрощенную модель канала, построение глазковой диаграммы и расчет волнового сопротивления микрополоски и стриплайна.

Основная часть. Комплекс объединяет три модуля: *Encoder* (генерация и кодирование), *Eye Diagram* (построение глазковой диаграммы) и *PCB Calc* (расчет волнового сопротивления печатных линий). В *Encoder* формируются идеальная временная диаграмма и сигнал после прохождения модели канала; этот массив используется в *Eye Diagram* для построения глаза. В *PCB Calc* по параметрам W , H , T и ϵ_r вычисляется Z_0 микрополосковой линии и стриплайна по формулам *IPC*. Комплекс ориентирован на учебные лабораторные работы и демонстрации, для чего и был разработан удобный интерфейс (рисунок 1):

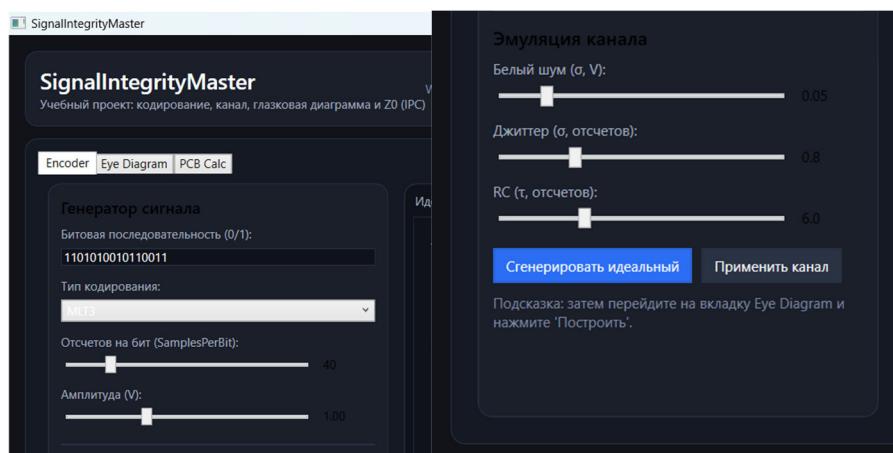


Рисунок 1 – Главное окно проекта с вкладками *Encoder*, *Eye Diagram* и *PCB Calc*

Архитектура реализована в *WPF (.NET 6)* по паттерну *MVVM*: вычисления выполняются во *ViewModel*, а графики отрисовываются на *Canvas (Polyline)*. Это упрощает сопровождение и расширение комплекса.

Формирование временных диаграмм выполняется по входной битовой строке с дискретизацией *SamplesPerBit* на битовый интервал (*UI*). Реализованы коды *NRZ* (двухуровневый), *Manchester* (переход внутри *UI*) и *MLT-3* (трехуровневый код с переходами при «1»), что позволяет сравнить плотность переключений и требования к полосе.

С практической точки зрения *NRZ* прост и широко применяется, однако при высоких скоростях чувствителен к затуханию и помехам; *Manchester* обеспечивает самосинхронизацию за счет обязательного перехода внутри *UI*, но требует большей полосы; *MLT-3* снижает спектральную ширину по сравнению с *NRZ* за счет многоуровневости, что полезно для линий с ограниченной полосой.

Для приближения к реальным условиям передачи реализована упрощенная модель канала: аддитивный белый шум (*AWGN*), джиттер и *RC*-фильтрация первого порядка. Шум добавляется к отсчетам как нормальная случайная величина с σ ; джиттер моделируется случайным смещением момента выборки с интерполяцией; *RC*-фильтр имитирует ограничение полосы и завал фронтов. В модели предусмотрена регулировка σ для *AWGN*, величины джиттера (в долях *UI*) и постоянной времени τ *RC*-фильтра. При сравнении идеального сигнала и сигнала после прохождения канала, где наблюдаются снижение крутизны фронтов при усилении фильтрации и рост амплитудного разброса при увеличении шумовой составляющей; при увеличении джиттера дополнительно ухудшается повторяемость момента переключения, что критично для высокоскоростных систем синхронного приёма (рисунок 2):



Рисунок 2 – Сравнение идеального сигнала и сигнала после канала (джиттер + *RC*-фильтрация + белый шум)

Глазковая диаграмма строится по сигналу после канала: последовательность нарезается на окна длиной несколько *UI* и фрагменты накладываются на один график. Вертикальное закрытие отражает рост амплитудного разброса (шум), горизонтальное - разброс моментов переходов (джиттер), а фильтрация снижает крутизну фронтов. В учебном режиме удобно наблюдать, как оптимальный момент выборки смещается, а окно по времени/амплитуде уменьшается при росте джиттера и шума (рисунок 3):

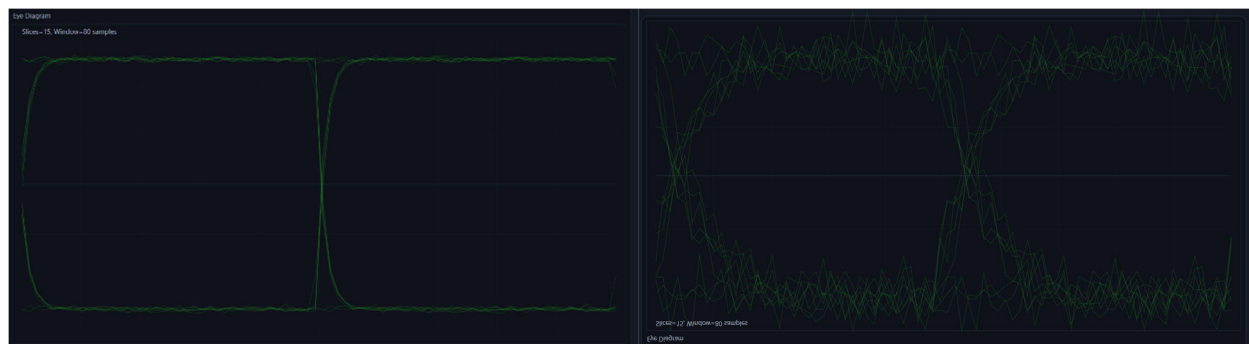


Рисунок 3 – Глазковая диаграмма при умеренных искажениях и при повышенных искажениях (закрытие глаза)

Для связи наблюдаемых искажений с параметрами межсоединений предусмотрен модуль *PCB Calc*, выполняющий расчёт волнового сопротивления Z_0 для двух типовых структур печатных линий: микрополосковой линии (*Microstrip*), и стриплайна (*Stripline*). Пример формы ввода и результата расчёта приведён далее (рисунок 4):

Рисунок 4 – Окно *PCB Calc*: расчет волнового сопротивления микрополосковой линии и стриплайна по параметрам W , H , T , ϵ_r

Пользователь задает W , H , T и ϵ_r , после чего по инженерным аппроксимациям *IPC* вычисляется Z_0 . Увеличение W снижает импеданс, увеличение H повышает его, а рост ϵ_r обычно уменьшает Z_0 . Это помогает быстро подобрать геометрию трассы под требуемые значения (например, 50/90/100 Ом). Для микрополоски и стриплайна различаются эффективная диэлектрическая проницаемость и зависимость Z_0 от высоты H , что учитывается выбранными аппроксимациями.

Заключение. Разработан учебный программный комплекс для моделирования целостности сигналов в высокоскоростных интерфейсах. Поддерживаются линейное кодирование (*NRZ*, *Manchester*, *MLT-3*), упрощенная модель канала (*AWGN*, джиттер, *RC*-фильтрация) и построение глазковой диаграммы для оценки запаса по времени и амплитуде. Модуль *PCB Calc* выполняет расчет волнового сопротивления микрополосковой линии и стриплайна по формулам *IPC*. Комплекс может использоваться как основа для учебных стендов по *SI* и последующего расширения модели канала.

Список литературы

1. *IPC-2141A:2004-04-21. Design Guide for High-Speed Controlled Impedance Circuit Boards*. IPC, 2004.
2. Bogatin E. *Signal and Power Integrity – Simplified*. 3rd ed. Pearson, 2018.
3. Johnson H., Graham M. *High-Speed Digital Design: A Handbook of Black Magic*. Prentice Hall, 1993.
4. Paul C. R. *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. 2nd ed. Wiley-IEEE Press, October 2007.

UDC 621.396.6.001

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE FOR MODELING SIGNAL INTEGRITY IN HIGH-SPEED INTERFACES

Zhuk Y.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Sobchuk N.S. – Senior Lecturer, Department of ETT

Annotation. An educational software tool for visualizing signal integrity in high-speed digital interfaces is presented. It supports *NRZ*, *Manchester* and *MLT-3* coding, a simplified channel model (*AWGN*, jitter and *RC* low-pass filtering) and eye diagram construction for assessing eye closure. The *PCB Calc* module estimates characteristic impedance of microstrip and stripline traces from W , H , T and ϵ_r using *IPC*-based formulas. Channel parameters can be adjusted interactively to observe their impact on eye opening.

Keywords: signal integrity; line coding; eye diagram; jitter; *AWGN*; *RC* filtering; characteristic impedance; microstrip; stripline; bandwidth limitation.

ТЕХНОЛОГИЯ СНИЖЕНИЯ ТОКОВ УТЕЧКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ $AlGaN/GaN$ ТРАНЗИСТОРОВ МЕТОДОМ КОМБИНИРОВАННОЙ LPCVD-ПАССИВАЦИИ И ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Жук Е.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Соловьев Я.А. – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры ЭТТ

Аннотация. Представлен метод изготовления мощных полевых транзисторов с гетеропереходом на основе нитрида алюминия-галлия и нитрида галлия на подложке из кремния. Ключевой особенностью является применение высокотемпературной пассивации нитридом кремния, полученным методом химического осаждения из газовой фазы при пониженном давлении, под затворным диэлектриком и использование топологии с полной изоляцией областей стока и истока металлом затвора. Экспериментально подтверждено, что данная комбинация эффективно подавляет поверхностные утечки, обеспечивая минимальный ток в закрытом состоянии при высоком напряжении стока.

Ключевые слова: полевой транзистор с гетеропереходом; нитрид алюминия-галлия; нитрид галлия; силовая электроника; ток утечки; пассивация; нитрид кремния; химическое осаждение из газовой фазы; топология затвора; изоляция стока; структура металл-диэлектрик-полупроводник; высоковольтный транзистор.

Введение. Мощные полевые транзисторы на основе гетероструктур нитрид алюминия-галлия с нитридом галлия *AlGaN/GaN Heterostructure Field-Effect Transistor (HFET)* являются перспективной элементной базой для силовой электроники и СВЧ-применений благодаря высоким значениям пробивных напряжений, рабочей температуры и частоты переключений. Особый интерес представляет реализация таких структур на кремниевых подложках, что существенно снижает стоимость производства по сравнению с подложками из карбида кремния или сапфира. Однако ключевой проблемой, ограничивающей надежность и эффективность высоковольтных GaN-транзисторов, остается высокий и нестабильный ток утечки в закрытом состоянии. Основными путями протекания токов утечки являются поверхность гетероструктуры и меза-изоляция. Традиционные методы пассивации (например, *Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)* химическое осаждение из газовой фазы, стимулированное плазмой) часто не обеспечивают достаточного подавления поверхностных состояний. В данной работе исследуется эффективность применения химического осаждения из газовой фазы при пониженном давлении нитрида кремния (*Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD) SiN*) в качестве первого слоя пассивации, расположенного непосредственно под затворным диэлектриком, в сочетании с топологическим решением по полной изоляции контактных площадок стока и истока металлом затвора. Целью работы является демонстрация того, что комбинация качественной межфазной границы, обеспеченной LPCVD-процессом, и «окольцовывающей» топологии затвора позволяет снизить токи утечки до уровня наноампер при напряжении стока до 600–700 В.

Основная часть. Экспериментальные образцы изготавливались на основе эпитаксиальных структур *AlGaN/GaN*, выращенных методом осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы (*Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)*) на подложке Si(111). Структура включала буферный слой, нелегированный канал GaN и барьерный слой *AlGaN*. Ключевой особенностью технологического маршрута являлось нанесение слоя пассивации SiN_x методом осаждения из газовой фазы при пониженном давлении (LPCVD) толщиной 100 нм при температуре 800°C до формирования омических контактов и затвора. Высокая температура осаждения способствует улучшению качества интерфейса и защите поверхности *AlGaN* от повреждений на последующих этапах обработки.

Важным конструктивным отличием разработанных транзисторов является формирование затворной структуры типа металл-оксид-полупроводник (*Metal-Oxide-Semiconductor HFET MOS-HFET*). В слое LPCVD SiN_x вытравливалась канавка с наклонными

стенками, после чего методом атомно-слоевого осаждения (*Atomic Layer Deposition (ALD)*) наносился подзатворный диэлектрик Al_2O_3 толщиной 10 нм. Таким образом, диэлектрик затвора формируется не просто на поверхности полупроводника, а перекрывает слой высококачественного *LPCVD SiNx*, который выполняет роль маски и дополнительной пассивации. Металлизация затвора формировалась с полевым электродом (*Field Plate*), выступающим на слой *SiNx* в сторону стока для снижения пиковых полей. Для исследования влияния топологии на токи утечки были реализованы и сравнены несколько вариантов конфигурации затворной шины. Наилучшие результаты показала топология, в которой металл затвора полностью «окольцовывает» (изолирует) не только область истока, но и область стока. Это создает потенциальный барьер, эффективно подавляющий поверхностные утечки через боковые стенки меза-изоляции (рисунок 1):

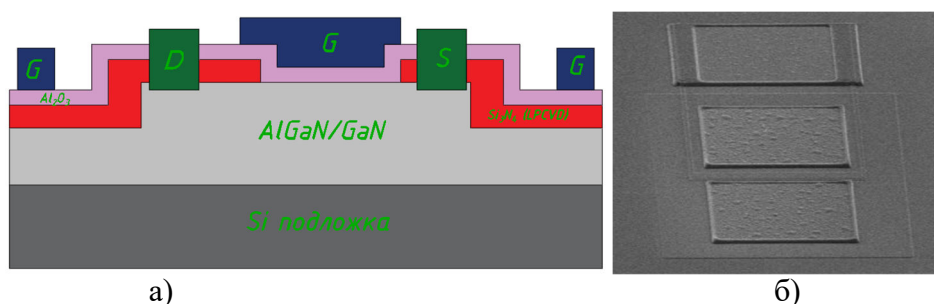


Рисунок 1 – Схематическое изображение: а – поперечное сечения структуры *MOS-HFET* с пассивацией *LPCVD SiNx*; б – топология с полной изоляцией стока затворной шиной (изображение получено при помощи растрового электронного микроскопа)

Измерения электрических характеристик показали, что наличие слоя *LPCVD SiNx* критически важно для снижения поверхностных состояний. Однако именно топологическое решение с полной изоляцией площадок стока и истока позволило достичь экстремально низких значений токов утечки.

На вольтамперных характеристиках в закрытом состоянии (при $V_{GS} = -10$ В) наблюдается существенная разница между топологиями. В структурах без полной изоляции ток утечки возрастает с увеличением напряжения стока. В то же время, разработанная структура с полной изоляцией демонстрирует стабильный ток утечки менее 20 нА/мм при напряжении на стоке $V_{DS} = 600$ В. Это подтверждает, что металл затвора, окружающий контактные площадки, эффективно перекрывает пути утечки по поверхности меза-структуры, которые не могут быть устранены одной лишь пассивацией. Также было отмечено, что применение *LPCVD SiNx* под слоем Al_2O_3 обеспечивает высокую однородность характеристик по пластине и снижает гистерезис, что свидетельствует о высоком качестве границы раздела диэлектрик/полупроводник (рисунок 2):

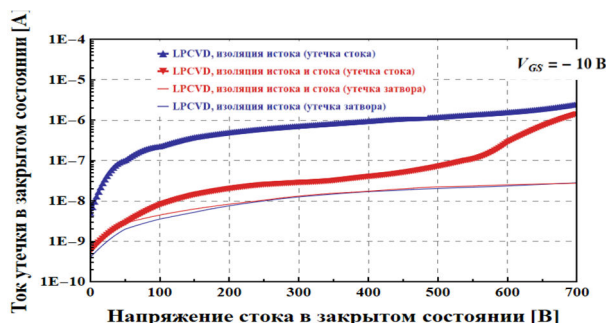


Рисунок 2 – Сравнение токов утечки в закрытом состоянии для различных топологий: существенное снижение тока и его стабилизация наблюдаются для структуры с полной изоляцией стока и истока (нижняя кривая)

Данный подход был масштабирован на мощные многопальцевые транзисторы с общей шириной затвора 80 мм. Топология с полной изоляцией активных областей металлом затвора в сочетании с качественной подзатворной пассивацией позволила достичь высоких выходных токов (более 20 А) при сохранении низкого сопротивления в открытом состоянии ($R_{on} \approx 0,22$ Ом). При этом блокирующая способность транзистора сохранялась вплоть до

напряжений 700 В, где ток утечки не превышал 1 мкА/мм. Важно отметить, что механизм подавления утечки в данной конструкции основан на электростатическом экранировании: потенциальный барьер, создаваемый затворной шиной вокруг стока, разрывает каналы проводимости, возникающие из-за дефектов травления мезы или поверхностных загрязнений. Это делает технологию применимой для приборов, работающих в режиме обогащения (D-mode), и каскодных схем.

Заключение. В работе представлен надежный технологический подход к созданию высоковольтных транзисторов *GaN-on-Si* с улучшенными характеристиками утечки. Показано, что применение высокотемпературного LPCVD SiN_x в качестве первичной пассивации, поверх которой формируется MOS-структура с диэлектриком Al_2O_3 , позволяет минимизировать плотность поверхностных состояний. Ключевым результатом является экспериментальное подтверждение эффективности топологии с полной изоляцией областей стока и истока металлом затвора. Данное конструктивное решение в сочетании с предложенным маршрутом пассивации обеспечивает снижение токов утечки в закрытом состоянии до значений менее 1 мкА/мм (типично < 20 нА/мм) при напряжении 600 В, что значительно превосходит характеристики стандартных структур. Разработанная технология перспективна для производства высокоэффективных силовых преобразователей.

Список литературы

1. Deng L., Zhou L., Lu H., Yang L., Yu Q., Zhang M., Wu M., Hou B., Ma X., Hao Y. Comprehensive Comparison of MOCVD- and LPCVD- SiN_x Surface Passivation for AlGaIn/GaN HEMTs for 5G RF Applications. *Micromachines* (Basel), 2023; 14(11):2104.
2. Wang X., Huang S., Zheng Y., Wei K., Chen X., Liu G., Yuan T., Luo W., Pang L., Jiang H., Li J., Zhao C., Zhang H., Liu X. Robust SiN_x /AlGaIn Interface in GaN HEMTs Passivated by Thick LPCVD-Grown SiN_x Layer. *IEEE Electron Device Letters*, 2015; 36(7):666–668.
3. Lu X., Jiang H., Liu C., Zou X., Lau K.M. Off-state Leakage Current Reduction in AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors by Combining Surface Treatment and Post-gate Annealing. *Semiconductor Science and Technology*, 2016; 31:055019.
4. Ye P.D., Yang B., Ng K.K., Bude J., Wilk G.D., Halder S., Hwang J.C.M. GaN MOS-HEMT Using Atomic Layer Deposition Al_2O_3 as Gate Dielectric and Surface Passivation. *International Journal of High-Speed Electronics and Systems*, 2004; 14(3):791–796.

UDC 621.382.323:621.314

LEAKAGE CURRENT REDUCTION TECHNOLOGY FOR HIGH-VOLTAGE AlGaIn/GaN TRANSISTORS USING COMBINED LPCVD PASSIVATION AND TOPOLOGICAL ISOLATION

Zhuk Y.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Solovjov J.A. – Dr. of Sci., associate professor, Professor of the Department of ETT

Annotation. A fabrication method for high-power aluminum gallium nitride/gallium nitride heterojunction field-effect transistors on silicon substrates is presented. The key feature is the application of high-temperature silicon nitride passivation deposited by low pressure chemical vapor deposition under the gate dielectric combined with a topology providing complete isolation of source and drain regions by the gate metal. Experiments confirmed that this combination effectively suppresses surface leakage, achieving minimum off-state current at high drain voltage.

Keywords: aluminum gallium nitride; gallium nitride; heterojunction field-effect transistor; power electronics; leakage current; passivation; silicon nitride; low pressure chemical vapor deposition; gate topology; drain isolation; metal-oxide-semiconductor structure; high-voltage transistor.

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКООМНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК ОКСИДА И НИТРИДА КРЕМНИЯ-ТИТАНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Александрович П. А., Бохань Л.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Голосов Д. А. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. Исследованы зависимости электрофизических характеристик пленок оксида и нитрида кремния-титана от параметров процесса совместного магнетронного распыления. Установлено, что удельное сопротивление пленок нитрида и оксида кремния-титана имело сильную зависимость от концентрации реактивного газа в камере. Для всех образцов наблюдались отрицательные значения температурный коэффициент сопротивления (ТКС) ($0,04\%/^{\circ}\text{C} - 1,08\%/^{\circ}\text{C}$). При увеличении удельного сопротивления ТКС пленок увеличивался.

Ключевые слова: тонкопленочный резистор, реактивное магнетронное распыление, совместное распыление, удельное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления

Введение. В настоящее время для калориметрии и регистрации слабых оптических сигналов все больше стали применяться твердотельные кремниевые фотоумножители. В них используются интегрированные высокоомные гасящие резисторы сопротивлением 250 – 300 кОм. Традиционно в качестве материала высокоомного гасящего резистора используется поликремний. Однако поликремний имеет сравнительно высокие значения температурного коэффициента сопротивления $\text{ТКС} = (-2 - -3) \text{ кОм}/^{\circ}\text{C}$. Для изготовления высокоомных резисторов в ряде работ предложено использовать нитриды и оксиды кремния-титана. Титан и кремний имеют противоположные значения ТКС, а оксидирование или нитритизация такой смеси позволяет в широких пределах регулировать удельное сопротивление пленок. Для формирования пленок оксида и нитрида кремния-титана большие перспективы имеет метод совместного реактивного магнетронного распыления. В этом методе для получения многокомпонентных пленок используется несколько распылительных устройств и каждый элемент наносится отдельным магнетроном.

В данной статье будет рассмотрена зависимость ТКС резистивных пленок оксида и нитрида кремния-титана от концентрации азота и кислорода при их формировании.

Основная часть. Формирование пленок проводилось на экспериментальной установке следующей конфигурации (рисунок 1):

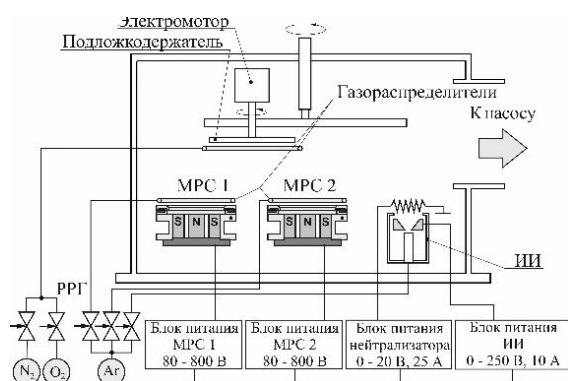


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для нанесения тонкопленочных слоев методом совместного реактивного магнетронного распыления

При нанесении пленок использовалась раздельная газоподача инертного и реактивного газов. Аргон подавался в газораспределительные системы магнетронов. Поток аргона в каждый магнетрон составлял $Q_{Ar} = 25 \text{ мл/мин}$. Реактивный газ (азот или кислород) подавался

в область подложки. Поток азота изменялся от 0 до 12,5 мл/мин. Поток кислорода изменялся от 0 до 7,5 мл/мин. Концентрация реактивного газа в камере рассчитывалась по формуле 1

$$\Gamma_R(\%) = \frac{Q_R}{Q_R + Q_{Ar}} 100, \quad (1)$$

где Γ_R – поток реактивного газа в камеру.

Соотношение Si и Ti в пленках регулировалась за счет изменения соотношения токов магнетронов. Ток разряда магнетронов изменялся от 0 до 1.5 А.

На рисунке 2 представлена зависимость удельного сопротивления и ТКС пленок нитрида кремния-титана от концентрации азота в Ar/N₂ смеси газов. При токе разряда магнетронов $I_{Ti} = 0,5$ А, $I_{Si} = 1,0$ А и распылении мишеней в среде Ar удельное сопротивление пленок составляло 10^{-5} Ом·м и экспоненциально увеличивалось при добавке азота. При концентрации азота в камере около 14,5 % удельное сопротивление пленок достигало 0,01 Ом·м. При дальнейшем увеличении Γ_{N_2} формировались диэлектрические пленки с поверхностным сопротивлением более 1 МОм/кв. ТКС пленок имел отрицательное значение и увеличивался до 1,08 %/°С при концентрации азота Γ_{N_2} с 0,04 %/°С при концентрации азота 16,7 %.

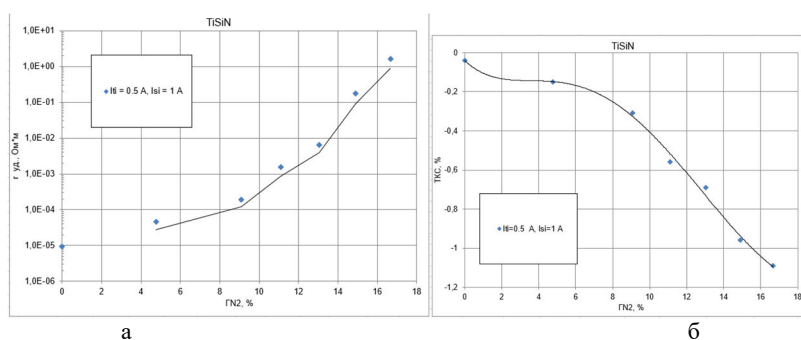


Рисунок 2 – Зависимость удельного сопротивления (а) и ТКС (б) пленок нитрида кремния-титана от концентрации азота в Ar/N₂ смеси газов

На рисунке 3 представлены зависимости удельного сопротивления и ТКС пленок оксида кремния-титана от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов. При увеличении Γ_{O_2} также наблюдалось резкое увеличение удельного сопротивления пленок. Пленки с удельным сопротивлением 0,01 Ом·м формировались при концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов около 9,5 %. Т.е. формирование диэлектрических пленок оксида кремния-титана наблюдалось при меньших концентрациях реактивного газа по сравнению с нитридом кремния-титана. ТКС пленок Ti_{1-x}Si_xO_y также был отрицательным. При увеличении Γ_{O_2} от 0 до 9,5 % ТКС пленок увеличивался от 0,04 %/°С до 0,8 %/°С.

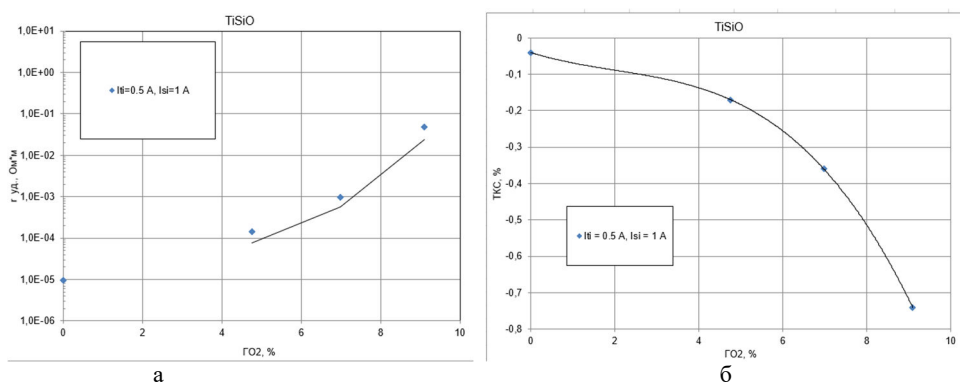


Рисунок 3 – Зависимость удельного сопротивления (а) и ТКС (б) пленок оксида кремния-титана от концентрации азота в Ar/N₂ смеси газов

Заключение. Проведены исследования влияния параметров процесса магнетронного распыления на состав, структуру и электрофизические характеристики пленок оксида и нитрида кремния-титана. На основе полученных экспериментальных данных установлено:

При распылении мишеней в среде Ar/N₂ рабочих газов удельное сопротивление пленок Ti_{1-x}Si_xN_y увеличивается и достигает значений 0,01 Ом·м при концентрации азота в Ar/N₂ смеси газов 16,7 %. ТКС пленок имеет отрицательное значение и увеличивается при увеличении Γ_{N_2} с 0,04 %/°C при концентрации азота 0 % до 1,08 %/°C при концентрации азота 16,7 %.

При распылении мишеней в среде Ar/O₂ рабочих газов удельное сопротивление пленок Ti_{1-x}Si_xO_y увеличивается и достигает значений 0,01 Ом·м при концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов около 9,5 %. ТКС пленок имеет отрицательное значение и увеличивается при увеличении Γ_{O_2} с 0,04 %/°C при концентрации кислорода 0 % до 0,8 %/°C при $\Gamma_{O_2} = 9,5$ %. При концентрации кислорода 9,5 %.

Список литературы

1. *Ti₅Si₄ Nanobats with excellent field emission properties* / C.-M. Chang [et al.] // *J. Phys. Chem. C*. – 2009. – Vol. 113. – P. 9153–9156.
2. *Observation of thermal growth of silicide on titanium-deposited silicon surfaces* / T. Iida [et al.] // *Surf. Sci.* – 2007. – Vol. 601. – P. 4444–4448.
3. *Chen, L. J. Metal silicides: an integral part of microelectronics* / L. J. Chen // *JOM The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. – 2005. – Vol. 57. – P. 24–30.
4. *Growth of high-density titanium suicide nanowires in a single direction on a silicon surface* / H. C. Hsu [et al.] // *Nano Lett.* – 2007. – Vol. 7. – P. 885–889.
5. *Strain sensitivity of TiB₂, TiSi₂, TaSi₂ and WSi₂ thin films as possible candidates for high temperature strain gauges* / G. Schultes [et al.] // *Sensors Actuators A Phys.* – 2006. – Vol. 126. – P. 287–291.
6. *Nitride films deposited from an equimolar Al–Cr–Mo–Si–Ti alloy target by reactive direct current magnetron sputtering* / H.-W. Chang [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2008. – Vol. 516. – P. 6402–6408.
7. *Plasma emission controlled multi-target reactive sputtering for in-situ crystallized Pb(Zr,Ti)O₃ thin films on 6" Si-wafers* / V. S. Vidyarthi [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2007. – Vol. 515. – P. 3547–3553.
8. *Multi-target reactive sputtering – a promising technology for large-area Pb(Zr,Ti)O₃ thin film deposition* / G. Suchaneck [et al.] // *J. of the European Ceramic Society*. – 2007. – Vol. 27. – P. 3789–3792.
9. *Murarka, S. P. Silicide formation in thin cosputtered (titanium+silicon) films on polycrystalline silicon and SiO₂* / S. P. Murarka, D. B. Fraser // *J. Appl. Phys.* – 1980. – Vol. 51. – P. 350–356.
10. *Plasma diagnostics. Discharge parameters and chemistry* / Ed.: O. Auciello, D.L. Flamm. – Academic Press, 1989. – 470 p.

UDC 621.3.049.77–048.24:537.2

FORMATION OF HIGH-RESISTANCE RESISTIVE FILMS OF OXIDE AND NITRIDE OF SILICON-TITAN BY MAGNETRON SPUTTERING

Alexandrovitch P.A., Bohan L.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Golosov D. A. – *Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ETT*

Annotation. The dependence of the electrophysical characteristics of silicon-titanium oxide and nitride films on the parameters of the magnetron co-sputtering process was studied. It was found that resistivity of the silicon-titanium nitride and oxide films deposited by the reactive magnetron co-sputtering method had a strong dependence on the concentration of the reactive gas in the chamber. Negative TCR values (0.04%/°C – 1.08%/°C) were observed for all samples. As the resistivity of the films increased, the TCR increased.

Keywords: thin film resistor, reactive magnetron sputtering, co-sputtering, resistivity, temperature coefficient of resistance

МОДЕЛЬ МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ ПРИ ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИИ

Гладких А.П., Сакович М.С., Соловьев А.Я.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научные руководители: Камлач П.В. - к. т. н., доцент
Чураков А.В. - к. м. н., доцент*

Аннотация. В статье рассматривается компьютерное моделирование мышечной ткани человека. Исследование посвящено анализу процесса электростимуляции мышц. Модель включает мышечные волокна, фасцию и электроды. Разработка выполнена в программной среде Sim4Life. Мышечная ткань представлена в виде сетчатой структуры волокон. Фасция моделируется как слой с пониженной электропроводностью. Электроды выполнены из медицинской нержавеющей стали. Симуляция проводилась в режиме воздействия переменным током. Результаты показали неоднородность распределения электрического поля. Выявлено, что глубина эффективного воздействия ограничена поверхностными слоями.

Ключевые слова: мышцы, фасция, электростимуляция, компьютерная модель

Введение. Компьютерное моделирование тканей человека является критически важным и актуальным направлением в современной медицине, биологии и биоинженерии. Оно позволяет создавать виртуальные модели органов и систем, имитировать их функции, анализировать реакции на внешние воздействия и прогнозировать развитие заболеваний [1].

В рамках данного исследования разработана и проанализирована объемная геометрическая модель мышечного комплекса, включающего фасциальную оболочку и мышечные волокна, а также электроды для последующего анализа результатов воздействия электростимуляции. Построение модели и последующий вычислительный эксперимент выполнены в программной среде Sim4Life.

Основная часть. Процесс исследования воздействия тока на мышечную ткань с помощью моделирования включает в себя два ключевых этапа, последовательное выполнение которых обеспечивает целостность научного анализа. Первый этап посвящен разработке геометрической модели, максимально приближенной к реальной анатомии и физическим свойствам исследуемой ткани. На этой стадии происходит оцифровка анатомии и создание виртуального полигона для испытаний. Второй этап направлен на выявление закономерностей распределения тока и его влияния на каждую из указанных структур. Именно здесь, на основе созданной геометрии, проводятся расчеты электромагнитных полей, позволяющие не просто увидеть пути прохождения тока, но и дать прогноз относительно эффективности и безопасности стимуляции для каждого типа ткани в отдельности, что является конечной целью всего исследовательского процесса.

Мышечная ткань, выступающая главным объектом исследования, является ключевым элементом разработанной модели. Для максимально достоверной имитации ее электрофизиологических характеристик мышечные волокна представлены не сплошным массивом, а в виде сетчатой структуры, имитирующей пучки миофибрилл и межклеточное пространство. Именно мышечная ткань, обладающая высокой проводимостью в областях скопления волокон (по сравнению с жиром или костью), играет основную роль при электрическом воздействии, выступая в качестве проводника и основной мишени для стимуляции. Детализация структуры волокон (их ориентация и плотность) позволяет повысить точность моделирования распределения тока и его воздействия, давая возможность

количественно оценить, как электрическое поле взаимодействует с тканью на микроуровне и какие именно зоны мышцы деполяризуются в первую очередь.

Модель, разработанная в среде Sim4Life [2], представлена на рисунке 1. Визуально она представляет собой многослойную структуру, однако исследователи сознательно пошли на упрощение: кожный покров в модели отсутствует. Это решение продиктовано физическими свойствами тканей: кожа обладает высоким омическим сопротивлением и могла бы искажать картину прохождения тока, если бы мы изучали поверхностные эффекты. Но поскольку основной целью исследования является именно анализ электростимуляции мышечной ткани (глубинной структуры), исключение кожи позволяет «обнажить» объект изучения и направить все вычислительные мощности на точный расчет процессов, происходящих непосредственно в мышечных волокнах под воздействием приложенных электродов.

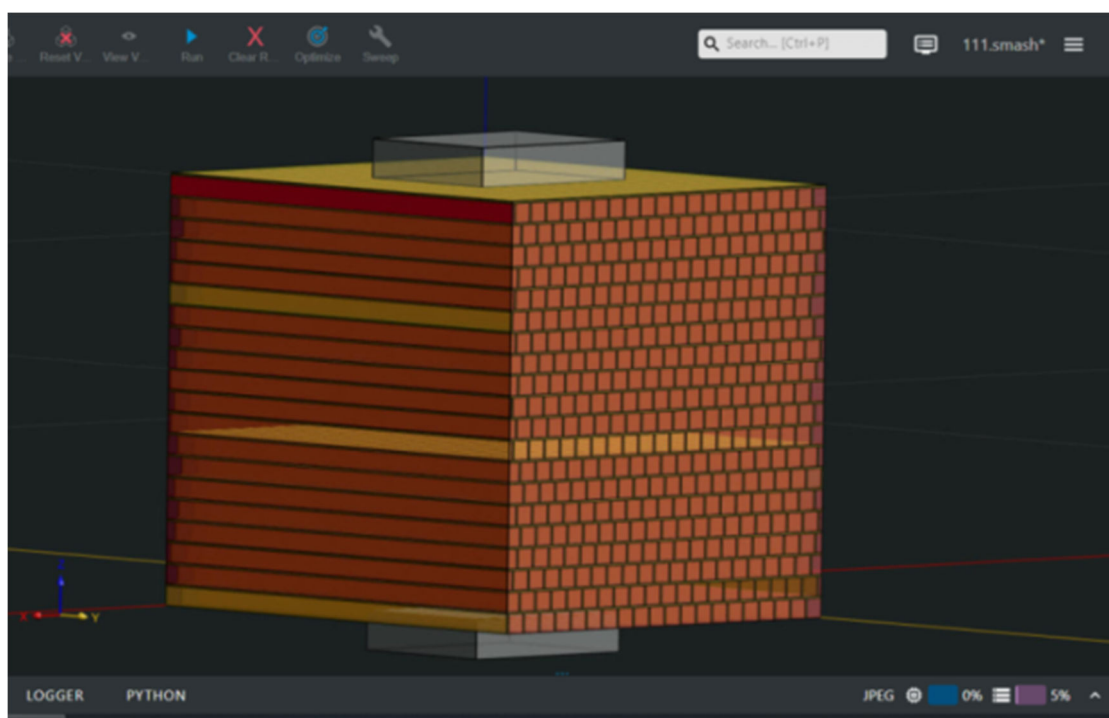


Рисунок 1 – Модель мышечной ткани в среде Sim4Life

Прослойкой между «блоками» мышечной ткани служит фасция, или же соединительная ткань. Введение этого элемента в модель принципиально важно для создания гетерогенной структуры, поскольку фасция, наряду с поддержкой мышечных структур, непосредственно влияет на распространение электрического тока. Ее электрофизиологические свойства заметно отличаются от мышечных: обладая меньшей проводимостью, чем мышцы, она, тем не менее, существенно влияет на распределение тока в областях, прилегающих к мышечным волокнам. Фасция работает как изолятор или ограничитель, создавая границы раздела сред, на которых происходит преломление силовых линий поля. Учет этого слоя позволяет модели избежать излишней идеализации и приблизить виртуальную картину воздействия к реальным процессам, происходящим в сложной архитектуре мягких тканей организма.

В качестве материала электродов была выбрана нержавеющая сталь. При построении виртуальной модели критически важно задавать корректные граничные условия, и выбор материала здесь не случаен. Нержавеющая сталь (прежде всего, медицинские марки 316L, 316LVM) является одним из наиболее изученных и широко применяемых материалов для стимулирующих электродов. Это подтверждается многолетними клиническими исследованиями, где такие электроды имплантировались сотнями и демонстрировали

стабильную работу [3]. Использование в симуляции параметров именно этого материала гарантирует, что результаты моделирования будут релевантны реальной клинической практике, а рассчитанные значения плотности тока и потенциалов на границе раздела «электрод-ткань» будут соответствовать поведению реальных имплантируемых систем.

Симуляция электростимулирующего воздействия проводилась также в среде Sim4Life. В качестве режима был выбран режим воздействия переменным током. Результаты симуляции представлены на рисунке 2.

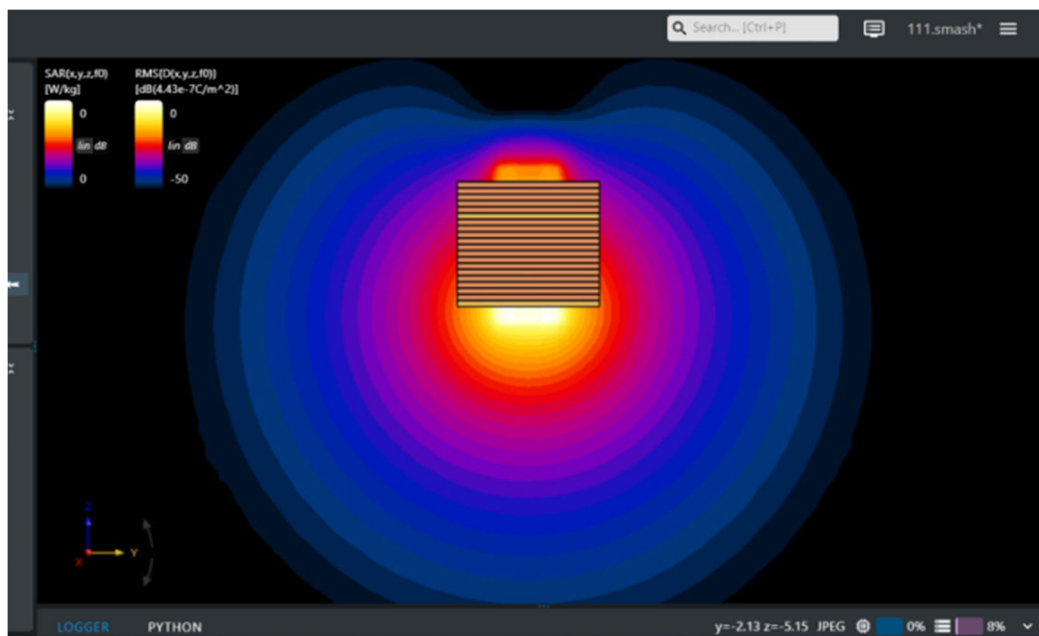


Рисунок 2 – Результат симуляции электростимуляции мышечной ткани в среде Sim4Life

Заключение. Значимость компьютерного моделирования в области исследования электростимуляции мышечных тканей трудно переоценить, особенно на этапе перехода от общих протоколов к персонализированной медицине. Созданная в среде Sim4Life модель, включающая фасцию и мышцы, выступает в роли цифрового полигона, где можно безопасно проводить эксперименты. Она позволяет детально визуализировать и количественно оценить распределение электрических полей в гетерогенной структуре тканей – увидеть, как влияет на ход тока наличие плотной соединительнотканной прослойки, которая часто выступает диэлектрическим барьером. Полученные данные подтверждают, что виртуальные эксперименты являются мощным инструментом для прогнозирования результатов физиотерапевтического воздействия: от подбора оптимальной частоты и силы тока до выбора места наложения электродов. Возможность заранее просчитать сценарий не только повышает эффективность терапии, но и служит целям минимизации рисков, связанных с индивидуальной чувствительностью или патологиями. Таким образом, моделирование становится фундаментом для перехода к персонализированным подходам в лечении, где каждый протокол стимуляции может быть адаптирован под уникальную анатомию и физиологию конкретного человека.

На основании результатов численного моделирования низкочастотного электровоздействия (0,1 Гц) на многослойную модель мышечной ткани установлено, что распределение удельного коэффициента поглощения (SAR) и плотности электрического смещения (D) характеризуется выраженной пространственной неоднородностью с преимущественной локализацией максимумов в зонах непосредственного контакта электродов. Градиентный анализ визуализированных полей подтверждает выраженное затухание интенсивности воздействия по направлению от периферии к центральным слоям.

Обнаруженное рассеивание поля за пределы геометрических границ мышечного блока в сочетании с характерным искажением изолиний на межслойных интерфейсах указывает на значительное влияние послойной структуры на формирование путей протекания тока, что в совокупности определяет преимущественное энерговыделение в приповерхностных структурах и ограничивает глубину эффективного терапевтического воздействия в квазистатическом режиме.

Список литературы

1. Лосенкова С.О., Погребняк А.В., Морозов Ю.А., Степанова Э.Ф. Компьютерное моделирование как один из современных методов прогнозирования в фармацевтической технологии // Фармация и фармакология. – 2014. – № 6 (7). – С. 105–112.
2. Sim4Life: The Premier Simulation Platform [Электронный ресурс] / Zurich Med Tech AG. – Режим доступа: <https://sim4life.swiss/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ. – (Дата обращения: 01.03.2026).
3. Scheiner A., Mortimer J.T. Design and clinical application of a double helix electrode for functional electrical stimulation // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 1994. – Vol. 41, № 5. – P. 425–432. – DOI: 10.1109/10.293217.

UDC 611.018.62

MUSCLE TISSUE MODEL UNDER ELECTROSTIMULATION

Gladkikh A.P., Sakovich M.S., Salaviev A.Ya.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Kamlach P.V. - Cand. of Sci., Associate Professor

Churakov A.V. – Cand. of Sci., Associate Professor

Annotation. This article examines the computer modeling of human muscle tissue. The study is dedicated to analyzing the process of muscle electrical stimulation. The model includes muscle fibers, fascia, and electrodes. The development was carried out in the Sim4Life software environment. Muscle tissue is represented as a mesh structure of fibers. The fascia is modeled as a layer with reduced electrical conductivity. The electrodes are made of medical-grade stainless steel. The simulation was performed using alternating current exposure. The results demonstrated a non-uniform distribution of the electric field. It was revealed that the depth of effective exposure is limited to the surface layers.

Keywords: muscles, fascia, electrical stimulation, computer model.

МОБИЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БОЛЕВЫХ СИНДРОМОВ

Стасенко М.И.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Давыдов М.В. – к.т.н., доцент, первый проректор

Аннотация. Разработано мобильное приложение для регистрации болевых синдромов, позволяющее пациентам самостоятельно проводить опросы на смартфоне без необходимости посещения неврологического центра и оперативно передавать данные врачу. Стороной API для врачей реализован сканер печатных опросников для автоматизации ввода результатов и снижения трудозатрат на обработку, а для пациентов – история опросов с аналитикой и статистикой динамики болевых ощущений. Установлено, что использование приложения сокращает время первичного обследования на 85%, повышает точность фиксации симптомов и обеспечивает основу для персонализированного мониторинга. Предложена методика интеграции опросников с оптическим распознаванием (OCR) для врачей и цифровыми формами с аналитикой для пациентов.

Ключевые слова: мобильное приложение, болевые синдромы, опросники боли, медицинская аналитика, неврология

Введение. Широкое распространение хронических болевых синдромов в неврологической практике, сопровождающееся постоянным дискомфортом пациентов, выдвигает на первый план задачу минимизации физических нагрузок при первичном обследовании. Традиционный подход, требующий от человека, испытывающего непрерывную боль, поездки в неврологический центр для минутного опроса, создает значительные трудности, ухудшая состояние пациента и снижая качество мониторинга симптомов [1].

В данной статье автором представлена разработка мобильного приложения, использующего унифицированные опросники для стандартизированной оценки боли непосредственно на смартфоне с оперативной отправкой данных врачу, полностью исключая необходимость передвижения в состоянии боли. API-интерфейс обеспечивает врачам автоматизированный сканер печатных форм с оцифровкой данных, а пациентам – персонализированную историю опросов и аналитику динамики симптомов.

Основная часть. При разработке мобильного приложения для регистрации болевых синдромов необходимо решить следующие три ключевые задачи:

- обеспечить стандартизированную оценку боли с использованием унифицированных опросников непосредственно на смартфоне;
- организовать эффективный обмен данными между пациентами и врачами через API-интерфейс;
- упростить работу врачей за счет интеграции сканера печатных опросов с автоматической оцифровкой данных.

Разработка проводилась в двух взаимодействующих областях: клиентское мобильное приложение для пациентов, реализующее опросники McGill и DN4, историю и аналитику болевых синдромов, и врачебный интерфейс того же приложения с дополнительным модулем сканера печатных форм. Модуль пациентов формирует структурированные данные опросов для экспорта врачу, а врачебный модуль обеспечивает прием результатов с автоматической оцифровкой заполненных форм и обратную связь пациентам [3].

Функционирование приложения контролировалось по завершении каждого цикла пользовательского тестирования. После прохождения полного набора сценариев проводился анализ работоспособности всех модулей с последующей верификацией корректности экспорта данных.

Таким образом, общий функциональный алгоритм работы мобильного приложения представлен следующим образом (рисунок 1).

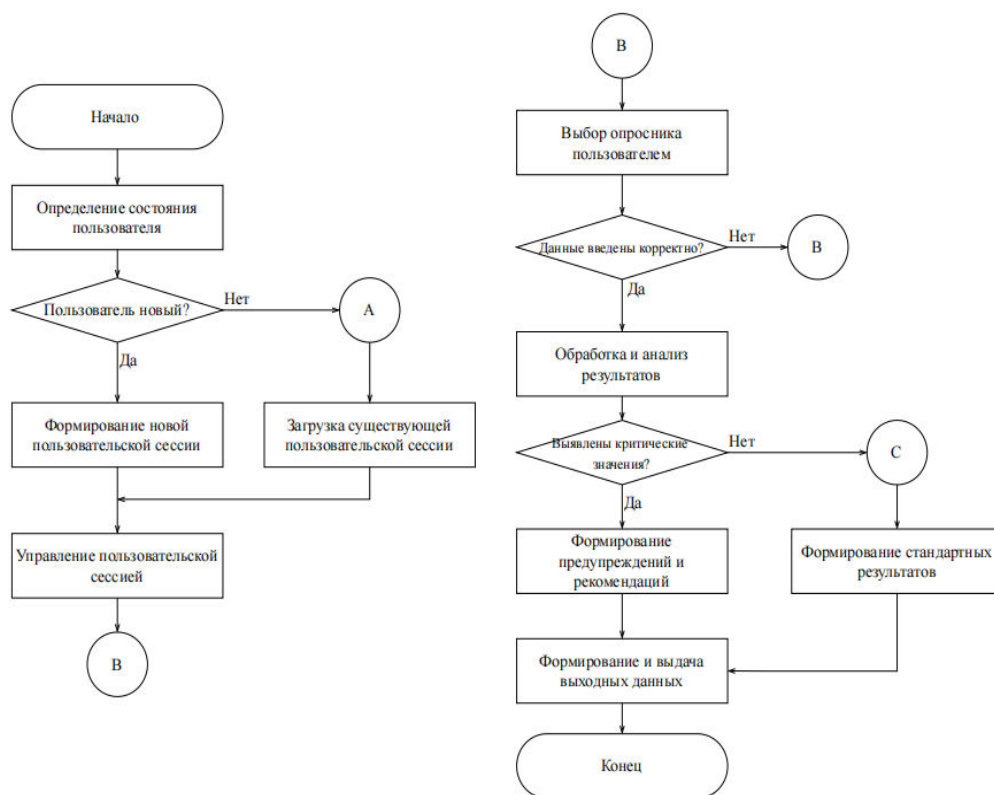


Рисунок 1 – Функциональный алгоритм работы

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность предложенной архитектуры приложения, где пользовательский интерфейс опросников связан с API-интерфейсом для надежного обмена данными между пациентами и врачами.

Особое внимание уделено модулю сканера печатных форм, который обеспечивает врачам автоматическую оцифровку традиционных бумажных опросов, существенно сокращая время на первичную обработку данных. Разработанный функциональный блок аналитики позволяет пациентам визуализировать динамику болевых синдромов через графики и тренды, обеспечивая объективный мониторинг эффективности терапии.

Разработанная методика демонстрирует высокую практическую эффективность для оптимизации мониторинга болевых синдромов в условиях амбулаторной неврологической практики [4].

Заключение. Разработано мобильное приложение для регистрации болевых синдромов, позволяющее пациентам заранее формировать полную картину динамики боли на смартфоне. Установлено сохранение объективности оценки симптомов при исключении необходимости постоянного прохождения физического осмотра на приеме у врача. Определена высокая эффективность API-интерфейса с модулем сканера печатных форм для врачей и персонализированной аналитикой для пациентов.

Список литературы

1. Bouhassira D., Attal N. et al. Comparison of the pain suppressive effects of clinical and experimental painful conditioning stimuli // *Brain*. – 2003. – Vol. 126. – Pp. 1068-1078.
2. Melzack R. The McGill Pain Questionnaire: major properties and scoring methods // *Pain*. – 1975. – Vol. 1, № 3. – Pp. 277-299.
3. Kristjánsdóttir Ó.B. et al. A smartphone app to support self-management of chronic pain // *JMIR mHealth and uHealth*. – 2019. – Vol. 7, № 8. – e12776.
4. Charlson M.E., Pompei P. et al. A new method of classifying prognostic comorbidity in longitudinal studies: development and validation // *J. Chronic Dis*. – 1987. – Vol. 40, № 5. – Pp. 373-383.
5. Bushnell M.C., Čeko M., Low L.A. Cognitive and emotional control of pain and its disruption in chronic pain // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2013. – Vol. 14. – Pp. 502-511.

UDC 616.8-008.9:681.5

MOBILE APPLICATION FOR PAIN SYNDROME REGISTRATION

Stasenko M.I.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Davydov M.V. – Cand. of Sci., associate professor, first Vice-Rector

Annotation. A mobile application has been developed for pain syndrome registration, enabling patients to independently conduct surveys on smartphones without the need to visit a neurology center and promptly transmit data to physicians. The API side for physicians implements a scanner of printed questionnaires for automated result entry and reduction of processing workload, while for patients it provides survey history with analytics and statistics of pain sensation dynamics. It has been established that the application reduces primary examination time by 85%, improves symptom recording accuracy, and provides a basis for personalized monitoring. A methodology for integrating questionnaires with optical character recognition (OCR) for physicians and digital forms with analytics for patients has been proposed.

Keywords: mobile application, pain syndromes, pain questionnaires, medical analytics, neurology.

ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМОЕ УСТРОЙСТВО УДАЛЁННОГО МОНИТОРИНГА ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ АНАЛИЗОМ ПАРАМЕТРОВ

Бобровский П.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Кудина А.В. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. Разрабатывается программно-управляемое автономное устройство удалённого мониторинга холодильного оборудования, обеспечивающее сбор данных от подключённых датчиков, их интеллектуальный анализ на уровне edge-вычислений, выявление аномалий работы системы и передачу информации для повышения надёжности эксплуатации и эффективности управления холодильными установками.

Ключевые слова: удалённый мониторинг, холодильное оборудование, интернет вещей, IoT, edge-вычисления, интеллектуальный анализ данных, предиктивная диагностика, датчики, промышленный мониторинг, автоматизация.

Введение. Программно-управляемое автономное устройство удалённого мониторинга холодильного оборудования представляет собой самостоятельный аппаратно-программный шлюз, известный как edge-устройство [1]. Оно функционирует в качестве центральной точки для сбора данных, их предварительной обработки и последующей передачи информации, полученной от разнообразных датчиков, подключённых к холодильной системе. Кроме того, это устройство обеспечивает возможность дистанционного управления различными исполнительными компонентами, такими как реле, клапаны и частотные преобразователи.

Основная часть. Устройство спроектировано для установки непосредственно у объекта мониторинга, который может располагаться в серверной комнате, внутри холодильной камеры, в распределительном щите или даже на наружной стене транспортного средства. Оно работает в автономном режиме, независимо от наличия внешнего персонального компьютера, поскольку оснащено собственным процессором, системой энергообеспечения, часами реального времени, а также средствами связи как с облачными сервисами, так и с мобильными операторами. Само устройство не способно измерять какие-либо параметры без подключения внешних датчиков. Все необходимые измерения поступают от подключённых сенсоров, которые могут отслеживать температуру, давление, ток, влажность, факт открытия дверей, утечки фреона и другие важные параметры.

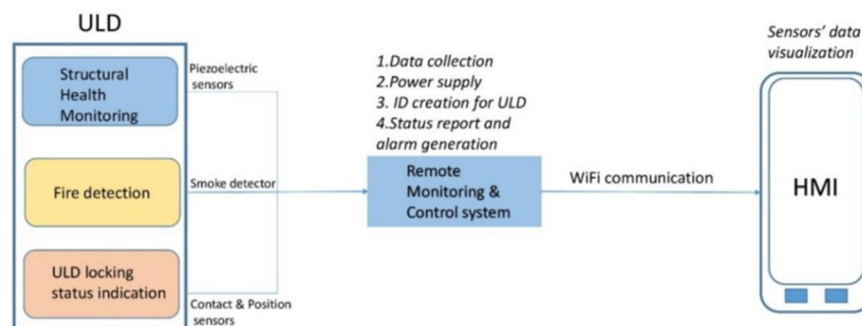


Рисунок 1 – Структурная схема системы удалённого мониторинга

Устройство проектируется модульным и сенсор-агностическим, что позволяет ему быть гибким и универсальным в различных применениях. Стандартный набор интерфейсов обеспечивает подключение разнообразных датчиков и контроллеров, включая цифровые и аналоговые варианты [1]. Для измерения температуры могут быть использованы датчики 1-Wire/DS18B20. Для интеграции с промышленными датчиками и контроллерами предусмотрен интерфейс RS-485, работающий по протоколу Modbus RTU [4]. Кроме того, интерфейсы I²C и SPI позволяют подключать платы расширения, расширяя функциональные возможности устройства. Аналоговые входы поддерживают сигналы 4–20 mA и 0–10 V, что подходит для подключения датчиков давления и уровня. Универсальные GPIO позволяют интегрировать герконы, датчики открытия дверей и датчики протечки. Для управления и контроля коммутации устройство оснащено релейными выходами и опторазвязками. Дополнительно, в зависимости от конфигурации, могут быть доступны интерфейсы CAN или Modbus TCP/IP для взаимодействия с другими устройствами и системами. Для обеспечения связи с удалённым сервером и мобильным приложением устройство поддерживает различные варианты подключения, включая Ethernet, Wi-Fi и сотовые сети (LTE/5G, NB-IoT). На случай потери основного соединения предусмотрен резервный канал связи, который может быть реализован через SMS или LoRaWAN. Блок питания устройства поддерживает технологию PoE (Power over Ethernet), что упрощает его подключение и снижает количество необходимых кабелей. Кроме того, предусмотрена возможность использования автономной батареи или UPS (Uninterruptible Power Supply) для обеспечения непрерывной работы устройства при отключении основного электропитания.

На борту устройства функционирует встроенная операционная система и комплекс специализированных сервисов, обеспечивающих полный цикл обработки данных: сбор данных с датчиков, предварительную фильтрацию для удаления шумов и избыточной информации, проверку целостности для обеспечения достоверности собранных данных, сжатие для оптимизации хранения и передачи, а также шифрование для защиты данных от несанкционированного доступа. Кроме того, на устройстве имеется локальная временная база данных для хранения хронологически упорядоченной информации и продвинутый движок аналитики, позволяющий проводить глубокий анализ собранных данных. Интеллектуальная составляющая системы реализована в виде гибридного решения, объединяющего правила и модели машинного обучения [5]. В частности, используется rule-engine для отслеживания критических порогов и сценариев безопасности, таких как падение давления хладагента или выход температуры за допустимые пределы. Дополнительно применяются модели anomaly-detection и predictive-maintenance, обученные на обширных исторических профилях работы оборудования, что позволяет осуществлять раннее выявление деградации компрессора, утечек или неэффективной работы системы. Устройство также производит корреляционный анализ, сопоставляя изменение температуры с током компрессора, временем открытия дверей и уличной температурой, чтобы точно отличать нормальные сезонные колебания от аномалий. Важно отметить, что интеллектуальный анализ выполняется непосредственно на границе сети (edge), что позволяет устройству быстро детектировать срочные проблемы и формировать информативные, контекстные тревоги [2]. Однако, в соответствии с принятым архитектурным ограничением, устройство предназначено в первую очередь для мониторинга и дистанционного управления, а не для замены решений, принимаемых оператором. Оно генерирует предупреждения, диагностические отчёты и рекомендации, а реальные корректирующие команды выполняются либо по удалённым инструкциям оператора, либо через административные политики, заданные владельцем системы. Хотя существует опция «автоматическое безопасное вмешательство», по умолчанию она остаётся отключенной, подчёркивая приоритет ручного управления и контроля.

Основной функционал и особенности:

1 Сбор и унификация данных от разных типов датчиков (температура, давление, ток, вибрация, влажность, CO₂, положения дверей).

2 Локальная проверка качества данных (фильтрация выбросов, декодирование, верификация сигнатур датчиков), отслеживание «здоровья» сенсоров (контроль обрыва, шумов, калибровочных дрейфов).

3 Edge-аналитика: детекция аномалий, прогноз отказов, выявление трендов энергопотребления и эффективности.

4 Система уведомлений и эскалации: push-уведомления, SMS, e-mail, интеграция с платформами мониторинга (SCADA, CMMS) через REST/HTTPS, MQTT, WebSocket.

5 Дистанционное управление: исполнение команд удалённого оператора (включение/выключение компрессора, перевод в режим энергосбережения, открытие/закрытие клапанов) через безопасный канал; журналирование всех действий.

6 Гибкая политика выборки: адаптивные частоты опроса (обычно 1–60 с) и агрегация для передачи, чтобы экономить трафик при стабильной работе и увеличивать детализацию при наличии аномалий.

7 FOTA (firmware-over-the-air) и управление конфигурацией: удалённый деплой обновлений и смена параметров без физического доступа.

8 Интерфейс администратора и API для интеграции в статьи, отчёты, CRM и ERP – готовые графики, CSV/JSON-экспорт, и готовые шаблоны отчетности для соответствия требованиям пищевой и фармацевтической отраслей.

Главная задача устройства – обеспечить непрерывную и надёжную видимость состояния холодильного оборудования в режиме реального времени, минимизировать время простоя и предотвратить потери продукции за счёт раннего обнаружения неисправностей и быстрого оповещения ответственных лиц. В практическом выражении это означает сокращение сроков реакции на аварии и инциденты, оптимизацию энергопотребления посредством детального анализа режимов работы оборудования [3] и предоставления рекомендаций по настройке для достижения максимальной эффективности, а также планирование технического обслуживания на основе реального износа оборудования, а не строго по календарному графику. Кроме того, устройство обеспечивает поддержку соответствия санитарным и регуляторным требованиям благодаря автоматической записи ключевых параметров и формированию хронологически подписываемых логов, что является важным для аудита и соблюдения нормативных требований. Для крупных сетей, таких как супермаркеты, логистические центры и фармацевтические склады, требующие непрерывного поддержания cold-chain, устройство предоставляет масштабируемую и гибкую платформу мониторинга с единым протоколом сбора данных и комплексной аналитикой. Это существенно упрощает управление парком холодильного оборудования, обеспечивая единый взгляд на состояние всех единиц оборудования и позволяя принимать обоснованные решения на основе данных.

В современных условиях эксплуатации холодильного оборудования, особенно в сферах пищевого производства, фармацевтики, логистики и распределённых торговых сетях, приоритетными становятся энергоэффективность, обеспечение контроля температурных режимов и минимизация влияния человеческого фактора. Разрабатываемое устройство отвечает этим вызовам благодаря своей автономной архитектуре и интеллектуальному анализу данных на периферии (edge-аналитике). Оно не просто передаёт телеметрические данные в облако, а непосредственно анализирует параметры на месте установки. Это особенно важно при нестабильной связи, территориальной разрозненности объектов и высоких требованиях к скорости реакции – критические события регистрируются и обрабатываются мгновенно без задержек на стороне сервера.

Важным преимуществом является адаптивный характер мониторинга. Устройство динамически изменяет частоту опроса датчиков и глубину анализа в зависимости от текущего

состояния системы: в стабильном режиме оно работает в энергосберегающем и трафико-оптимизированном формате, при обнаружении аномалий автоматически повышает детализацию сбора данных и формирует расширенную диагностическую картину. Такой подход позволяет одновременно снижать эксплуатационные расходы и повышать точность прогнозирования отказов. В условиях роста тарифов на электроэнергию и ужесточения нормативных требований к хранению продукции это дает ощутимый экономический эффект.

Оригинальность решения заключается в сочетании трех уровней интеллектуальности в одном автономном устройстве: контроль корректности самих датчиков (обнаружение деградации сенсоров), корреляционный анализ взаимосвязанных параметров холодильного цикла и встроенные предиктивные алгоритмы, ориентированные специально на холодильные процессы. Большинство существующих систем на рынке либо являются простыми регистраторами температуры, либо зависят от облачных вычислений для анализа. В данном случае аналитическое ядро реализовано на уровне устройства, что создает эффект «локального цифрового эксперта», способного формировать контекстные выводы без постоянной зависимости от внешней инфраструктуры.

Отсутствие прямых аналогов обусловлено комплексной концепцией: устройство разрабатывается не как датчик, не как универсальный промышленный контроллер и не как облачная платформа, а как специализированный интеллектуальный узел мониторинга холодильного оборудования с возможностью масштабирования в распределенную сеть. Уникальность достигается за счет модульности интерфейсов подключения, встроенной системы самодиагностики, гибридной аналитической модели и независимой автономной работы. Такая комбинация функционала формирует новый класс решений на стыке технологий Интернета вещей (IoT), предиктивной диагностики и отраслевой специализации, что делает устройство технологически оригинальным для современного этапа развития рынка.

Устройство проектируется с учётом простоты внедрения, что включает в себя настраиваемые профили подключения различных типов датчиков для сбора точных данных, гибкие режимы безопасности для защиты передаваемой информации, а также локальные графические интерфейсы пользователя (GUI) и LED-индикаторы для первичной диагностики и устранения неисправностей непосредственно на месте установки устройства. Кроме того, в комплекте поставки предусмотрены подробные инструкции по калибровке и проверке датчиков, что обеспечивает их точную и надежную работу на протяжении всего срока службы. В сети допускается групповая работа устройств, что позволяет осуществлять кластеризацию данных для формирования региональных сводок и более эффективного анализа информации. Ключевыми эксплуатационными требованиями к устройству являются точная синхронизация времени с использованием протоколов NTP или встроенных часов реального времени (RTC), резервирование каналов связи для обеспечения бесперебойной работы, надежная защита от несанкционированного доступа с помощью таких технологий, как безопасная загрузка (secure boot), протокол TLS и шифрование данных при передаче по протоколам REST и MQTT. Помимо этого, устройство должно быть способно функционировать в жестких температурных и вибрационных условиях, что делает его пригодным для использования в различных промышленных и сложных окружающих средах.

Разрабатываемое программно-управляемое устройство удалённого мониторинга холодильного оборудования представляет собой специализированное автономное решение нового поколения, ориентированное на интеллектуальный анализ параметров и повышение надёжности эксплуатации. Его архитектура объединяет модульный сбор данных от подключаемых датчиков, локальную edge-аналитику, систему самодиагностики и защищённую удалённую связь, что позволяет обеспечить непрерывный контроль состояния оборудования без постоянной зависимости от облачной инфраструктуры.

Практическая ценность устройства выражается в снижении рисков аварий, минимизации потерь продукции, оптимизации энергопотребления и переходе к предиктивному обслуживанию. Интеллектуальный анализ взаимосвязанных параметров холодильного цикла формирует качественно новый уровень мониторинга – от простой фиксации показателей к интерпретации и прогнозированию.

Заключение. Таким образом, предлагаемое решение формирует самостоятельный класс специализированных интеллектуальных устройств для холодильной отрасли, сочетая автономность, аналитическую глубину и отраслевую направленность. Это делает его перспективной платформой для цифровизации и модернизации систем холодоснабжения в современных условиях.

Список литературы

- 1 Баранов, А. В. Применение технологий Интернета вещей в системах промышленного мониторинга / А. В. Баранов, И. С. Кузнецов // Информационные технологии. – 2021. – № 7. – С. 15–22.
- 2 Громов, В. А. Edge-вычисления в распределённых системах сбора и обработки данных / В. А. Громов, П. Н. Сидоров // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2022. – № 5. – С. 3–11.
- 3 Чернышев, К. В. Методы повышения энергоэффективности холодильных установок на основе интеллектуального анализа параметров / К. В. Чернышев, А. С. Панов // Холодильная техника. – 2022. – № 3. – С. 34–40.
- 4 Кравченко, Д. И. Применение протоколов MQTT и Modbus в системах удалённого мониторинга оборудования / Д. И. Кравченко, О. Н. Матвеев // Электронные средства и системы управления. – 2020. – № 1. – С. 45–52.
- 5 Широков, П. А. Интеллектуальные системы технической диагностики и мониторинга: современные подходы и перспективы развития / П. А. Широков, В. Н. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64, № 9. – С. 731–740

UDC 62-529

SOFTWARE-CONTROLLED REMOTE MONITORING DEVICE FOR REFRIGERATING EQUIPMENT WITH INTELLIGENT PARAMETER ANALYSIS

Bobrovsky P.D.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Kudina A. V. – Cand. of Sci, Associate Professor

Annotation. A software-controlled autonomous device for remote monitoring of refrigeration equipment is being developed. This device collects data from connected sensors, performs intelligent analysis at the edge computing level, detects system anomalies, and transmits information to improve the reliability and efficiency of refrigeration systems.

Keywords. Remote monitoring, refrigeration equipment, Internet of Things, IoT, edge computing, intelligent data analysis, predictive diagnostics, sensors, industrial monitoring, and automation.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА

Ордо С.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Кузьмар И.И – к.т.н., заведующая НИЛ2.2 НИЧ

Аннотация. В ходе проведения научных исследований установлены зависимости влияния параметров нестационарных режимов электролиза на функциональные свойства поликомпозиционных никелевых покрытий. Покрытия, сформированные с использованием импульсных униполярного и реверсированного токов, превосходят по микротвердости осадки, полученные на постоянном токе.

Ключевые слова: электрохимическое покрытие, разрыв, паяемость, контактное электросопротивление.

Введение. Никелевые покрытия обеспечивают высокую коррозионную стойкость, твердость и износостойкость, защищая металл от агрессивных сред и механических повреждений. Также никелирование позволяет покрыть деталь любой конфигурации, что способствует широкому распространению этого покрытия. Проведенный анализ научно-технической и патентной литературы позволил выделить основные направления для возможного эффективного управления элементным составом и твердостью композиционных покрытий [1]. Одним из методов является способ, основанный на изменении электрического режима питания ванны во время электролиза (нестационарный электролиз, и, в частности, как его разновидность, программноуправляемый электролиз). Появляется возможность в широких пределах регулировать качество получаемых систем металлизации, изменяя ток по определенным программам. При этом происходит послойное формирование осадка, что позволит сочетать пластичность, необходимую твердость и наполненность дисперсной фазой. В работе рассмотрено влияние условий электрохимического осаждения на функциональные свойства осадков [2].

Основная часть. Для электроосаждения использовали разработанный в БГУИР программно-аппаратный комплекс для исследовательских и опытно-промышленных целей в состав которого входят высокочастотный источник питания импульсно-реверсным током ИП 24-2, позволяющий формировать в гальванической ванне импульсы тока положительной и отрицательной полярности, параметры которых задаются при помощи управляющего компьютера. Максимальный ток нагрузки источника питания ИП 24-2 составляет 2А; частота импульсов может задаваться от 1 до 10000 Гц. При исследованиях частота импульсного тока изменялась от 10 до 1000 Гц, амплитудная плотность тока – от 1 до 10 А/дм², длительность импульса и паузы – от 0,1 до 700 мс.

Для перемешивания электролита-суспензии, обеспечения однородности и поддержания частиц во взвешенном состоянии, использовали магнитную мешалку – оборудование бесконтактного действия, предназначенное для быстрого и безопасного перемешивания жидких веществ, в результате чего получаются растворы, эмульсии, суспензии (рисунок 1). В лабораторный стакан помещали магнитный стержень со специальным покрытием из тефлона или полиэтилена, где магнитное поле приводит его в действие, создавая вихревой поток, смешивающий жидкость. Магнитная мешалка с подогревом оснащена нагревающей пластиной, размещенной над электромагнитом. Модели с подогревом способны обеспечить степень нагрева смешиваемого вещества до 500 °С. Преимуществами такого метода перемешивания являются бесшумная работа и компактность аппарата; закрытая емкость,

отсутствие смешивающих деталей гарантирует безопасную работу с токсичными химикатами, исключая их разбрызгивание и вдыхание образующихся испарений; функция подогрева расширяет возможности работы с разными веществами.

Из сульфатного электролита никелирования, модифицированного различными фракциями углерода, получены электрохимические покрытия с использованием постоянного тока при различных плотностях тока и температуре электролита, а также методом нестационарного электролиза при частоте поляризующего тока $f = 1-100$ Гц и различных значениях длительности импульсов $\tau_{\text{имп}} = 3-300$ мс и длительности паузы $\tau_{\text{паузы}} = 7-700$ мс для униполярного импульсного тока, и длительности прямого импульса $\tau_{\text{пр}} = 0,6-300$ мс и длительности обратного импульса $\tau_{\text{обр}} = 0,06-100$ мс для реверсированного тока. Результаты исследований для каждого образца представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты исследований для каждого образца

№	m1, г	m2, г	Δm , г	S, дм^2	t, мин	I, А	ВТ, %	d, мкм	ϑ , мкм/мин
P1	2,6433	2,6614	0,0181	0,042	10	0,105	94,46	4,84	0,484
P2	2,6069	2,6223	0,0154	0,038	10	0,190	44,41	4,55	0,455
P3	2,393	2,408	0,015	0,036	10	0,181	45,54	4,67	0,467
P4	2,5584	2,5707	0,0123	0,038	10	0,285	23,65	3,64	0,364
P5	2,5643	2,5804	0,0161	0,038	10	0,190	46,43	4,76	0,476
P6	2,409	2,4238	0,0148	0,035	10	0,175	46,34	4,73	0,473
P7	2,489	2,504	0,0149	0,036	10	0,105	77,99	4,64	0,464
P8	2,621	2,6381	0,0171	0,046	10	0,385	24,34	4,16	0,416
P9	2,604	2,617	0,0128	0,019	10	0,299	23,44	7,61	0,761
P10	2,426	2,441	0,0147	0,040	10	0,333	24,19	4,13	0,413
P11	2,538	2,6144	0,0762	0,041	50	0,103	37,61	20,88	0,418
P12	2,491	2,5698	0,0786	0,042	50	0,105	54,69	21,03	0,421
P13	2,581	2,6511	0,0697	0,042	50	0,105	36,37	18,65	0,373
P14	2,607	2,6848	0,0778	0,042	50	0,105	54,13	20,81	0,416
P15	2,5811	2,6599	0,0788	0,042	50	0,105	54,83	21,08	0,422
P16	2,6853	2,7636	0,0783	0,042	50	0,210	32,69	20,95	0,419
P17	2,5123	2,587	0,0747	0,040	50	0,200	40,93	20,98	0,420
P18	2,5599	2,6621	0,1022	0,040	50	0,100	67,20	28,71	0,574

Для измерения микротвердости в проведенных исследованиях применялся микротвердомер Leica VMHT MOT (Кноор). Оценка микротвердости на приборе основана на измерении величины диагонали отиска, получаемого от вдавливания с определенной нагрузкой алмазной пирамиды в исследуемый материал. Нагрузку на алмазную пирамиду можно было изменять от 1 до 2000 гр. Микротвердость покрытий в зависимости от условий электроосаждения изменяется от 7477 МПа при электроосаждении на постоянном токе до 3350-5917 МПа на импульсном, 3833-7543 МПа на реверсированном и 4946,7 -8096,7 МПа при использовании программируемых токов.

Для измерения износостойкости в проведенных исследованиях применялся микротрибомер МТ 4.05 (рисунок 1). Параметры прибора: контролируемая нормальная нагрузка 10 мН – 1 Н; скорость скольжения 0,1 – 10 мм/с. Для проведения триботехнических испытаний использовалась схема сфера-плоскость, позволяющая наиболее точно рассчитать площадь пятна контакта и величины контактного давления, а также исключить неизбежное влияние наклона индентора и пластины на геометрию контакта.

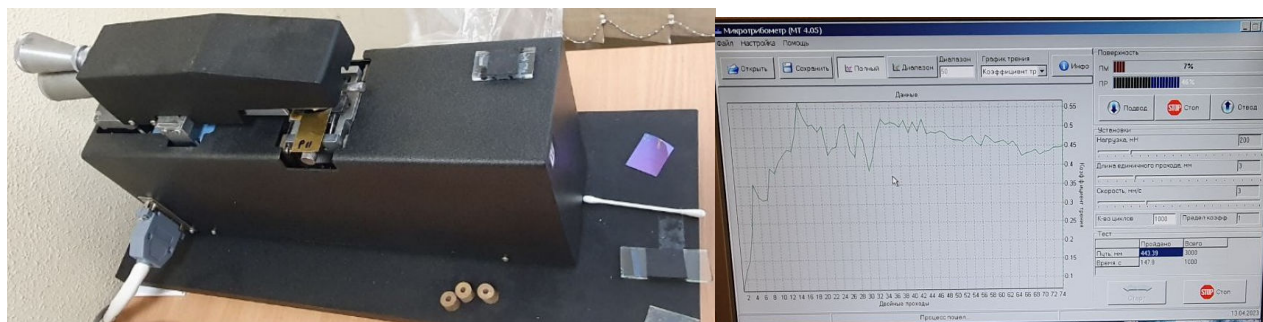


Рисунок 1 – Микротрибومتر МТ 4.05 и окно управляющей программы

Покрyтия наносили на латунную пластину. Передача, прием и обработка данных осуществляется с помощью персонального компьютера. Программное обеспечение позволяет устанавливать скорость движения образца, величину нормальной нагрузки и длину трека, вести запись величины силы и коэффициента трения. Для каждого образца проводились измерения как вдоль линии прокатки так и поперек.

Основываясь на экспериментальных данных установили, что осаждение с никелевой матрицей ультрадисперсных алмазов на различных токах приводит к варьированию величины объемного износа получаемых покрытий. Износостойкость КЭП резко возрастает с увеличением содержания дисперсной фазы в электролите, обеспечивая высокие антифрикционные свойства (таблица 4.4). Во время проведения исследований на износостойкость получены результаты коэффициента трения k : P10 – $k = 0.75$, P11 – $k = 0.45$, P12 – $k = 0.16$. Использование комбинированных токов позволяет уменьшить коэффициент трения, что позволяет придать никелевому покрытию большую износостойкость. Коэффициент трения варьируется от $k=0,53$ при электроосаждении на постоянном токе до $k=0,44-0,77$ на импульсном, $k=0,26-0,33$ на реверсированном и $k=0,14-0,43$ на программируемых токах.

Коррозионную стойкость покрытий оценивали по данным электрохимических измерений коррозионных токов и скоростей саморастворения. Толщина исследуемых покрытий, нанесенных на латунные подложки 6,0 или 30,0 мкм. Скорость саморастворения металла измеряли гравиметрическим методом. Образец с осажденным покрытием промывали в дистиллированной воде, тщательно высушивали, а затем взвешивали. После чего помещали его в агрессивную среду (раствор NaCl 30 г/л) на 8 суток. Прокорродировавшие образцы извлекали из раствора, промывали дистиллированной водой, тщательно высушивали и снова взвешивали. Исследуемые образцы визуально не имеют очагов поражения коррозии (рисунок 4.14). Варьирование параметрами поляризующего тока позволило получить покрытия без видимых очагов коррозии, а скорость коррозии снизилась в 1,2..2,8 раза.

Заключение. Исследованы функциональные свойства поликомпозиционных никелевых покрытий и установлены зависимости изменения скорости осаждения, микротвердости, износостойкости и скорости коррозии осадков от параметров поляризующего тока. Установлено, что применение нестационарных режимов электролиза позволяет управлять структурой и свойствами поликомпозиционных никелевых покрытий. По сравнению с покрытиями, осажденными на постоянном токе, они обладают более высокой микротвердостью, гладкой мелкозернистой поверхностью и улучшенными электрическими характеристиками. Формирование многослойных структур с чередующимися микрослоями компенсирует пористость - основной недостаток гальванического никеля. Таким образом, нестационарный электролиз является эффективным методом получения покрытий с заданными улучшенными свойствами для радиоэлектронной промышленности.

Список литературы

1. Импульсное электроосаждение и свойства композиционных покрытий никель-оксид графена / В. Н. Целуйкин, [и др.] // Москва: Физикохимия поверхности и защита материалов, 2023. Т. 59, № 3. С. 305-309.
2. Шушков, Р.В. Влияние режима электролиза на свойства никелевых покрытий / Р.В. Шушков, Н.Д. Соловьева // Москва: Успехи в химии и химической технологии, 2007. Т. 21, № 10. С. 29-33..

UDC 615.47:615.844.5

**INFLUENCE OF PROGRAMMABLE ELECTROLYSIS MODES
ON FUNCTIONAL PROPERTIES
POLYCOMPOSITE NICKEL COATINGS**

Kot P.V., Ordo S.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Kuzmar I.I. – Cand. of Sci., Head of the Research Laboratory of R&D Department

Annotation. In the course of scientific research, the dependences of the influence of the parameters of programmable electrolysis modes on the functional properties of polycomposite nickel coatings have been established. Coatings formed using pulsed unipolar and reversed currents are superior in micro-stability to precipitation obtained with direct current.

Keywords: electrochemical coating, rupture, solderability, contact electrical resistance.

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЫХАНИЯ

Жуковский Н.Е.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Ревинская И.И – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. В работе рассматривается разработка веб-приложения для автоматизированной функциональной диагностики дыхания на основе бесконтактного анализа видеопотока. Исследование выполнено путем проектирования и реализации клиент-серверной архитектуры, включающей модули аутентификации, управления пациентами, работы с видеофайлами и анализа дыхательных движений. Анализ проведен на основе применения алгоритмов компьютерного зрения и методов цифровой обработки сигналов для выделения паттернов дыхания. Предложенный подход позволяет визуализировать процесс дыхания и на основе полученных данных движений грудной клетки оценить временные характеристики дыхания и косвенно определить дыхательные объемы.

Ключевые слова: функциональная диагностика дыхания, визуализация дыхания, веб-приложение, компьютерное зрение, анализ видеопотока, клиент-серверная архитектура, FastAPI, цифровая обработка сигналов.

Введение. Функция внешнего дыхания служит важнейшим индикатором состояния дыхательной системы человека. Распространенность респираторных заболеваний, таких как бронхиальная астма и ХОБЛ, требует не только точной первичной диагностики, но и постоянного динамического наблюдения [1]. Традиционные методы, такие как спирометрия, несмотря на свою надежность, требуют дорогостоящего оборудования и активного участия пациента, что ограничивает их применение для массовых скрининговых исследований [2]. В настоящее время актуальными и перспективными являются методы, основанные на бесконтактном анализе дыхательных движений грудной клетки [3].

Целью работы являлась разработка веб-приложения для визуализации процесса дыхания на основе бесконтактного анализа видеопотока с камеры. Приложение является кроссплатформенным, что позволяет работать с ним из любого современного браузера без установки дополнительного ПО.

Основная часть. В рамках исследования была спроектирована трехуровневая архитектура системы «клиент-сервер». Серверная часть реализована на асинхронном фреймворке *FastAPI (Python)* с использованием *JWT*-аутентификации для разграничения прав доступа врачей [4]. Выбор *FastAPI* обусловлен его высокой производительностью, наличием автоматической генерации документации и встроенной поддержкой асинхронных операций, что критически важно для задач обработки видеоданных.

Для хранения медицинских данных и метаданных видеофайлов используется *PostgreSQL* – реляционная система управления базами данных, соответствующая принципам *ACID*, что гарантирует целостность медицинской информации [5]. Архитектура базы данных включает три основные таблицы: *users* (учетные данные врачей), *patients* (характеристики пациентов) и *patient_videos* (метаданные видеофайлов). Для хранения видеофайлов используется гибридный подход: метаданные хранятся в *PostgreSQL*, а сами файлы сохраняются в файловой системе сервера в иерархической структуре папок.

Система безопасности реализована как многоуровневая архитектура, включающая аутентификацию по *JWT*-токенам (с разделением на *access* и *refresh* токены), валидацию загружаемых файлов по типу контента и размеру (максимум 500 МБ), проверку прав доступа для каждого запроса [6]. Все операции включают проверку принадлежности текущему авторизованному врачу, что предотвращает несанкционированный доступ к медицинским данным.

Модуль управления пациентами реализует полный *CRUD*-функционал для работы с медицинскими картами. Врач может создавать новые карты пациентов с указанием персональных данных (имя, фамилия, возраст, пол), антропометрических показателей (рост, вес) и информации о курении. Система автоматически рассчитывает индекс массы тела (ИМТ) на основе введенных данных. Интерфейс отображает список пациентов в виде карточек с основной информацией и предоставляет поиск для быстрого доступа к нужной карте.

Клиентская часть разработана на нативном *JavaScript*, *HTML5* и *CSS3*, что минимизирует требования к ресурсам. Интерфейс предоставляет врачам инструменты для аутентификации, управления картотекой пациентов, загрузки видеофайлов с записью дыхательных движений и просмотра результатов анализа.

Основу аналитического ядра системы составляет алгоритм обработки видеопотока, реализованный на языке *Python* с использованием библиотек компьютерного зрения *OpenCV* и машинного обучения *scikit-learn*. Процесс анализа включает несколько последовательных этапов. Первым этапом является сегментация человека на видео с использованием алгоритма кластеризации *K-Means*. Исходный кадр преобразуется из цветового пространства *BGR* в *LAB*, которое обеспечивает лучшую инвариантность к изменениям освещения. Использование *BGR* в качестве исходного формата обусловлено стандартами библиотеки *OpenCV*, однако прямое применение этого пространства для анализа малоэффективно из-за сильной корреляции каналов и чувствительности к яркости. Именно поэтому выполняется преобразование в цветовое пространство *LAB*. В отличие от *BGR*, пространство *LAB* приближено к человеческому восприятию цвета и разделяет информацию об интенсивности и цветовых компонентах. Благодаря этому алгоритм кластеризации *K-Means* получает возможность более устойчиво группировать пиксели, ориентируясь на цветовые характеристики объекта, что позволяет эффективнее отделить фигуру человека от фона даже при неоднородном освещении.

Полученная бинарная маска подвергается морфологической обработке: операция открытия для удаления шумов и операция закрытия для заполнения небольших пробелов внутри области человека (рисунок 1).

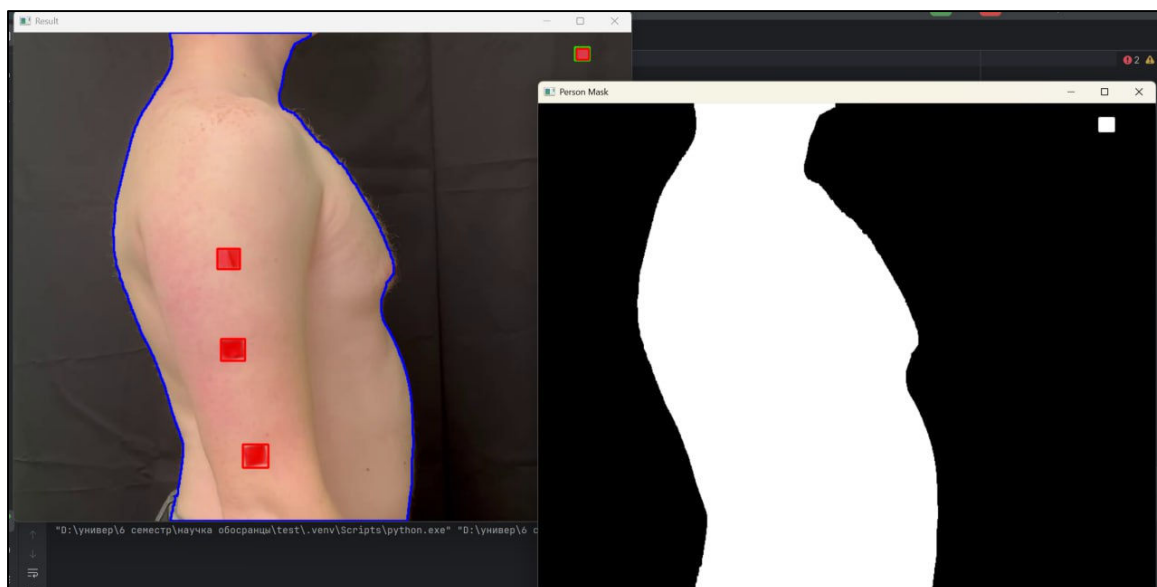


Рисунок 1 – Выделение маски

Вторым этапом является обнаружение цветовых маркеров на теле пациента. Для обеспечения инвариантности к интенсивности освещения используется цветовое пространство *HSV* [7]. Для каждого поддерживаемого цвета (красный, зеленый, синий) в системе заданы диапазоны нижних и верхних границ. Для красного цвета, ввиду его

расположения на границе цветового круга, применяются два диапазона: 0–10 и 170–180 градусов. После применения пороговых фильтров и морфологической обработки выделенные контуры анализируются: отбрасываются контуры площадью менее 25 пикселей, а для оставшихся вычисляется соотношение сторон, которое должно находиться в диапазоне 0,7–1,4, что соответствует квадратной форме маркера.

Для устойчивого отслеживания маркеров между кадрами реализован трекер, использующий алгоритм сопоставления на основе евклидова расстояния. Каждому обнаруженному маркеру присваивается уникальный идентификатор. В последующих кадрах для каждого нового маркера вычисляется расстояние до всех активных маркеров из предыдущих кадров, и выбирается ближайший, если расстояние не превышает порогового значения (30 пикселей). Это позволяет отслеживать перемещение маркеров при небольших движениях пациента и обеспечивает временную согласованность данных.

Модуль анализа дыхания предоставляет возможность запуска автоматизированного анализа загруженных видео. В интерфейсе настройки анализа врач выбирает цвет маркера (красный, зеленый, синий) и указывает его физический размер в миллиметрах. После запуска система отображает прогресс выполнения анализа в реальном времени. По завершении формируется детальный отчет, включающий: частоту дыхания, амплитуду дыхательных движений, графики дыхательных движений для каждой линии, текстовое заключение с классификацией типа дыхания (нормальное, тахипноэ, брадипноэ). Все результаты сохраняются в истории анализов пациента и доступны для повторного просмотра (рисунок 2).

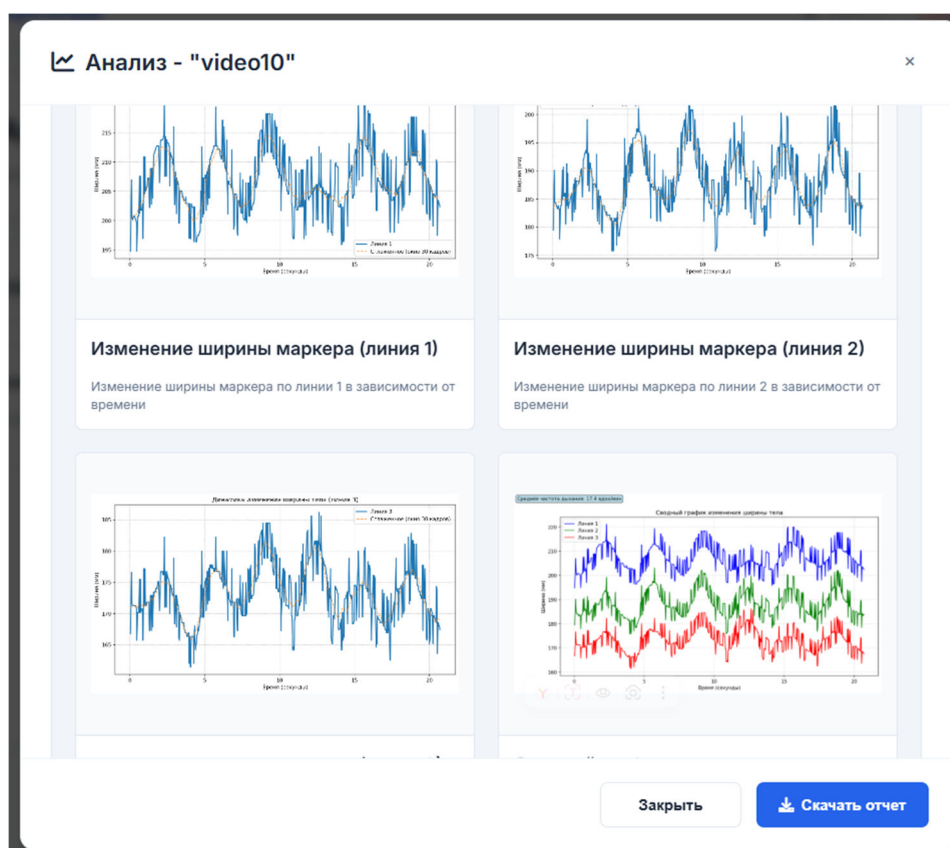


Рисунок 2 – Модальное окно графического анализа

Заключение. Практическая значимость работы заключается в создании инструмента, который позволяет провести оценку количественных показателей дыхательной функции. В результате разработки получено полностью функционирующее веб-приложение для бесконтактной диагностики дыхания, обеспечивающее автоматическое выделение контура пациента с помощью алгоритма *K-Means* и точное отслеживание дыхательных движений посредством детекции цветовых маркеров. Система вычисляет ключевые клинические

параметры: частоту дыхания через спектральный анализ Фурье и амплитуду, предоставляя врачу структурированные результаты в личном кабинете пациента.

Теоретическая ценность исследования состоит в демонстрации эффективности применения методов компьютерного зрения (алгоритма кластеризации *K-Means*) и цифровой обработки сигналов для решения задач медицинской диагностики. Перспективы дальнейшего применения приложения связаны с возможностью использования разработанного приложения как инструмента экспресс-диагностики дыхания.

Список литературы

1. Всемирная организация здравоохранения. Хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ) – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-\(copd\)](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-(copd)).
2. Standardization of Spirometry 2019. An Official American Thoracic Society and European Respiratory Society Technical Statement – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.atsjournals.org/doi/10.1164/rccm.201908-1590ST>
3. Revinskaya, I. I. Hardware-software complex for studying of breathing volume parameters = Аппаратно-программный комплекс для исследования объемных параметров дыхания / I. I. Revinskaya, P. V. Kamlach, Y. I. Liashchevich // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series = Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2023. – Vol. 68, no. 2. – P. 149–155.
4. FastAPI Documentation – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fastapi.tiangolo.com/tutorial/>
5. PostgreSQL Documentation – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.postgresql.org/docs/current/tutorial-transactions.html>
6. OWASP Cross Site Scripting – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cheatsheetseries.owasp.org/cheatsheets/css>
7. OpenCV. OpenCV Documentation [Электронный ресурс]. – 2025. – Режим доступа: <https://docs.opencv.org>.

UDC 616-78

WEB APPLICATION FOR FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF RESPIRATION

Zhukovskiy N.E.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Revinskaya I.I. – Senior Lecturer at the Department of the department of ETT

Annotation. This work presents the development of a web application for automated functional diagnostics of respiration based on contactless video stream analysis. The study was carried out by designing and implementing a client-server architecture, which includes modules for authentication, patient management, video file handling, and respiratory motion analysis. The analysis was conducted using computer vision algorithms and digital signal processing methods to identify breathing patterns. The proposed approach makes it possible to visualize the breathing process and, based on the obtained data on chest movements, assess the temporal characteristics of respiration and indirectly determine respiratory volumes.

Keywords. functional respiratory diagnostics, breathing visualization, web application, computer vision, video stream analysis, client-server architecture, FastAPI, digital signal processing

ИНТЕНСИВНОСТЬ СУБГАРМОНИКИ $F_0/2$ В СПЕКТРЕ КАВИТАЦИОННОГО ШУМА ПРИ КОЛЛЕКТИВНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ПУЗЫРЬКОВ В КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ

Курлюк Е.А., Лебедь А.А., Бойдич А.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Дежкунов Н.В. – к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 5.2

Аннотация. Рассматривается формирование субгармонической компоненты $F_0/2$ в спектре кавитационного шума. На основе численного моделирования акустического сигнала с импульсными возмущениями, соответствующими схлопываниям пузырьков, исследована зависимость амплитуды пика $F_0/2$ в спектре от амплитуды импульса на двойной частоте поля. Показано, что рост интенсивности субгармоники носит нелинейный характер.

Ключевые слова: кавитация, кавитационный шум, спектральный анализ, моделирование

Введение. При развитии кавитации в акустическом поле в жидкости формируется сложный акустический отклик, обозначаемый как кавитационный шум (КШ). Этот сигнал обусловлен суммарным акустическим воздействием кавитационных пузырьков, совершающих радиальные пульсации, перемещающихся в жидкости и испытывающих нестационарное схлопывание. В отличие от регулярного гармонического поля, возбуждающего кавитацию, кавитационный шум носит выраженный нестационарный и статистический характер. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что параметры кавитационного шума чувствительны к состоянию кавитационной области и режимам динамики пузырьков, включая степень синхронности их пульсаций и интенсивность импульсных процессов [1, 2]. Поэтому спектральный анализ кавитационного шума представляет собой эффективный метод исследования кавитации и оценки её активности.

Основная часть. Спектр КШ обычно содержит основную частоту возбуждающего ультразвукового поля, гармонические и субгармонические компоненты, комбинационные частоты и непрерывную составляющую. Их наличие и относительная интенсивность определяются режимом кавитации, концентрацией и размерами пузырьков, а также условиями распространения акустических волн в жидкости [3]. При этом механизмы формирования отдельных спектральных компонент кавитационного шума остаются недостаточно исследованными, что осложняет интерпретацию спектров и использование их параметров для количественной оценки состояния кавитационной области [4].

В настоящей работе рассматривается зависимость субгармонической компоненты спектре кавитационного шума от амплитуды коллективных колебаний кавитационной области. Для анализа используется численное моделирование акустического сигнала, регистрируемого в кавитационной области. Подробное описание алгоритма моделирования и его программной реализации приведено в работах, посвящённых анализу механизмов генерирования спектральных компонент КШ [5-7].

В модели акустический сигнал формируется на основе синусоидального ультразвукового поля с амплитудой давления P_0 , периодом T_0 , соответствующего докавитационному режиму. Воздействие кавитационных пузырьков учитывается введением импульсных возмущений давления с периодом T_i , соответствующих моментам их схлопывания. В простейшем случае такие импульсы повторяются с периодом ультразвукового колебания и приводят к появлению в спектре основной частоты F_0 и её гармоник [6]. Для приближения модели к реальным условиям учитываются стохастические отклонения параметров импульсов. В сигнал вводятся случайные смещения их фазового положения и амплитуды, отражающие асинхронность пульсаций пузырьков и статистический разброс условий их коллапса. Ранее показано, что

временная рассинхронизация импульсов приводит к формированию непрерывной составляющей спектра кавитационного шума [6, 7]. В алгоритме также учитываются нелинейные искажения сигнала, влияющие на распределение энергии между спектральными компонентами, включая субгармонику $F_0/2$. Полученный акустический сигнал анализируется в частотной области с использованием быстрого преобразования Фурье, что позволяет определить спектральную структуру кавитационного шума.

В ряде работ интенсивность субгармонической компоненты $F_0/2$ используется как один из параметров оценки состояния кавитационной области. Один из механизмов появления субгармоники в спектре КШ связан с переходом кавитационной системы в режим коллективной динамики пузырьков. В условиях высокой концентрации пузырьков кавитационная область реагирует на акустическое воздействие как единая система, формируя периодическую перестройку акустического сигнала. При этом схлопывания отдельных пузырьков остаются частично рассинхронизированными из-за разброса их радиусов и условий коллапса. Импульсы, создаваемые пузырьками, накладываются с временными и амплитудными отклонениями, что приводит к частичному размыванию дискретной структуры спектра и формированию непрерывной составляющей кавитационного шума.

Для моделирования данного режима дополнительно в сигнал вводились стохастические отклонения параметров импульсов. Амплитуда каждого импульса случайным образом изменялась в пределах $\Delta P = \pm 0,2P_0$, где указанная величина задаёт максимально возможное отклонение от среднего значения. Момент возникновения импульса также случайно смещался относительно его среднего положения в пределах $\Delta t = \pm 0,05T_{\text{и}}$, где $T_{\text{и}}$ – период ультразвукового сигнала. Таким образом, время появления каждого импульса варьировалось в заданном интервале вокруг соответствующей фазы ультразвукового периода, что моделирует асинхронность схлопывания пузырьков. На рисунке 1а, 1б представлены соответствующие спектры сигнала. Коллективная периодичность сохраняется в виде дискретных компонент спектра, однако временная рассинхронизация импульсов приводит к усилению непрерывной составляющей. При добавлении розового шума (рисунок 1б) возрастает мощность низкочастотной части непрерывной составляющей и усиливается широкополосный фон, что соответствует экспериментально наблюдаемому перераспределению спектральной мощности при развитой стохастичности кавитационного процесса [8].

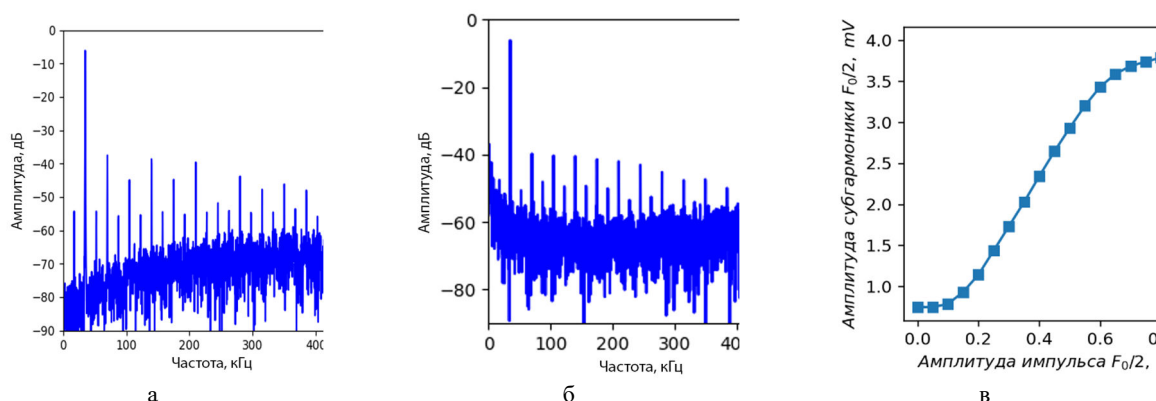


Рисунок 1 – Спектр сигнала при коллективном колебании кавитационной области: а – без добавления розового шума; б – с добавлением розового шума; в – зависимость мощности субгармоники $F_0/2$ от амплитуды сигнала с периодом $2T_0$ с учётом искажений.

На рисунке 1в представлена зависимость мощности субгармонической компоненты $F_0/2$ от амплитуды сигнала с периодом $2T_0$. Значение мощности определялось как максимум спектральной плотности в полосе частот $F_0/2 \pm 2,5$ кГц. Из графика видно, что при увеличении амплитуды двухпериодной составляющей интенсивность линии $F_0/2$ возрастает, однако рост носит выраженный нелинейный характер. В модели учитывается влияние временных смещений импульсов, амплитудных флуктуаций и вероятностных пропусков отдельных импульсов. Эти факторы приводят к частичному нарушению регулярности

двухпериодной структуры сигнала, уширению спектральной линии $F_0/2$ и перераспределению части энергии в непрерывную составляющую спектра. Дополнительный вклад в изменение формы зависимости вносят нелинейные искажения акустического тракта, вызывающие перераспределение энергии между спектральными компонентами. В результате увеличение амплитуды двухпериодной составляющей сопровождается монотонным, но существенно нелинейным ростом пиковой мощности субгармонической компоненты $F_0/2$.

Заключение. Проведённое моделирование показывает, что появление и рост субгармонической компоненты $F_0/2$ в спектре кавитационного шума связано с формированием двухпериодной структуры акустического сигнала при коллективной динамике кавитационной области. Установлено, что увеличение амплитуды соответствующей составляющей приводит к росту пиковой мощности линии $F_0/2$, однако зависимость имеет нелинейный характер. Это обусловлено влиянием фазовых и амплитудных флуктуаций импульсов, вероятностных пропусков импульсных событий и нелинейных искажений сигнала, вызывающих частичное уширение линии $F_0/2$ и перераспределение энергии в непрерывную составляющую спектра. Полученные результаты показывают, что при интерпретации интенсивности субгармонической компоненты необходимо учитывать влияние стохастических факторов и искажений акустического сигнала.

Список литературы

1. Evaluation of correlation between chemical dosimetry and subharmonic spectrum analysis to examine the acoustic cavitation / H. Hasanzadeh [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2010. – Vol. 17. – P. 863–86.
2. Kwon, O. Simultaneous measurements of acoustic emission and sonochemical luminescence for monitoring ultrasonic cavitation / O. Kwon // *The Journal of the Acoustical Society of America* – 2021. – P. 4477–4483. *Sonochemistry*, 40 (1), 104 (2018). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.004.
3. Дежгунов, Н. В. Анализ механизма генерирования непрерывной составляющей кавитационного шума / Н. В. Дежгунов, В. С. Минчук, С. В. Уваров, Е. А. Курлюк // *Письма в журнал технической физики*. – 2024. – Т. 50, вып. 6. – С. 7–10.
4. Pengfei, W. Acoustic Characterization of Cavitation Intensity: A Review / W. Pengfei // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2022. – Vol. 70. – P. 10.
5. Курлюк, Е. А. Моделирование однопузырьковой кавитации / Е. А. Курлюк, И. Е. Олещук, А. Ю. Перхунова, (науч. рук. Н. В. Дежгунов) // *Материалы 61-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР по направлению «Электронные системы и технологии»*, Минск, 21–25 апр. 2025 г. – Минск : БГУИР, 2025. – С. 362–365. – ISBN 978-985-543-817-6.
6. Курлюк, Е. А. Анализ механизма генерирования спектральных составляющих кавитационного шума / Е. А. Курлюк, И. Е. Олещук ; науч. рук. Н. В. Дежгунов, Ю. И. Савилова // *Сборник научных работ студентов Республики Беларусь «НИРС 2024»* / редкол.: А. Г. Баханович [и др.]. – Минск : Изд. центр БГУ, 2025. – С. 114–116. – 539 с. – ISBN 978-985-553-825-8.
7. Курлюк, Е. А. Механизмы генерирования спектральных компонент кавитационного шума / Е. А. Курлюк, А. Ю. Перхунова, В. С. Минчук, Н. В. Дежгунов // *Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП–2025): материалы XX юбилейной Всерос. (с междунар. участием) науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Бийск, 22–24 окт. 2025 г. / под ред. оргкомитета конф. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та им. И. И. Ползунова, 2025. – С. 115–116.*
8. Котухов, А. В. Комбинированный метод исследования акустической кавитации / А. В. Котухов, В. С. Гаврилюк, В. С. Минчук, Н. В. Дежгунов // *Доклады БГУИР*. – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 80–88.

UDC 534.8

INTENSITY OF THE $F_0/2$ SUBHARMONIC IN THE CAVITATION NOISE SPECTRUM DURING COLLECTIVE OSCILLATIONS OF BUBBLES IN THE CAVITATION REGION

Kurliuk E.A., Lebed A.A., Boidzich A.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Dezhkunov N.V. – Cand. of Sci., associate professor, Head of the Research Laboratory 5.2

Annotation. The formation of the subharmonic component $F_0/2$ in the cavitation noise spectrum is examined. Using numerical simulation of an acoustic signal with pulsed disturbances corresponding to bubble collapses, the dependence of the $F_0/2$ peak amplitude in the spectrum on the pulse amplitude at double the field frequency is investigated. It is shown that the increase in the subharmonic intensity is nonlinear.

Keywords: cavitation, cavitation noise, spectrum analysis, modeling

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ *BOSCH PROCESS* КАК ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА ТРАВЛЕНИЯ

Барковская К.Н.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ЭТТ

Аннотация. Рассмотрена технология выполнения плазмохимического травления *Bosch Process*. В данной статье представлен принцип данного метода, а также особенности проведения обработки материала при выполнении данного способа травления.

Ключевые слова: плазма, травление, плазмохимическое травление, плазменные технологии.

Введение. Плазменные технологии в последнее время являются важным инструментом в производстве микроэлектронных устройств. Выбирая правильные параметры обработки, можно сделать: плазменную очистку, плазменную активацию поверхности, плазменное осаждение, плазменное травление.

Плазменные технологии обладают следующими достоинствами;

- возможность обрабатывать сложные 3D-объекты и микроканалы;
- экологически чистая технология, без отходов химикатов;
- гибкая настройка процесса для придания поверхности специфических свойств;
- способность обрабатывать чувствительные к температуре материалы;
- возможность обрабатывать проводники, полупроводники и изоляторы и пр.;
- низкая стоимость обработки;
- возможность производить продукцию с высокой добавленной стоимостью по отношению к продукту и др [1].

Основная часть. Плазменное травление заключается в снятии материала с поверхностей с использованием плазменных процессов. Его называют также сухим травлением – в контрасте с традиционными мокрыми процессами травления, в которых используются агрессивные кислоты. Плазма технологических газов преобразовывает протравливаемый материал из твердого в газообразное агрегатное состояние, а вакуумный насос отсасывает газообразные продукты. Метод маскирования позволяет выполнять травление лишь отдельных участков или структур. Плазменное травление выполняется только в плазме низкого давления. Это обусловлено тем, что заметный эффект травления достигается путем длительной обработки, и все травящие газы могут использовать только в плазме низкого давления [2].

Существует 3 метода выполнения плазменного травления:

- ионное травление;
- ионно-химическое травление;
- плазмохимическое травление (ПХТ) [3].

Плазмохимическое травление – это передовая технология очистки поверхностей от органических и неорганических загрязнений с использованием плазменной и химической обработки. Это процесс удаления материала с поверхности с использованием плазменного разряда и химических реакций.

При классическом ионном травлении удаление частиц материала происходит за счет соударения ионов рабочего инертного газа, чаще всего аргона, с поверхностью образца. Однако скорость такого процесса невысока и зависит от коэффициента распыления материала изделия.

Чтобы ускорить скорость травления и сделать ее более селективной используется процесс плазмохимического травления, основное отличие которого от классического травления заключается в добавлении в рабочую камеру реактивного газа, чаще всего фтористого. За счет химической реакции с материалом образца и одновременной

бомбардировки инертным газом – аргоном становится возможен процесс глубокого травления, например кремния, который получил название *Bosch Process* [4].

Глубокое реактивное ионное травление (*DRIE*) кремния для создания микроструктур с высоким соотношением сторон является одним из ключевых процессов в области передовых *MEMS*-технологий и применения технологии *TSV* (*through silicon via*). Однако традиционные методы плазменного травления рассчитаны на глубину травления всего в несколько микрон, и им не хватает скорости травления и селективности по маске. Технология *Bosch Process* позволяет получать глубокие изображения с исключительной анизотропией, скоростью травления и селективностью по маске.

Этот процесс состоит из цикла, включающего в себя 3 шага: нанесение пленки, травление нижней плёнки и травление кремнием. В процессе нанесения на боковые стенки и нижнюю поверхность углубления наносится пассивирующая плёнка. При выполнении шага травления нижней плёнки на нижней поверхности углубления пассивирующую плёнку травят выборочно. На этапе травления кремнием на нижней поверхности углубления травят только кремний, где была удалена пассивирующая плёнка. Данный процесс изображён на рисунке 1 [5].

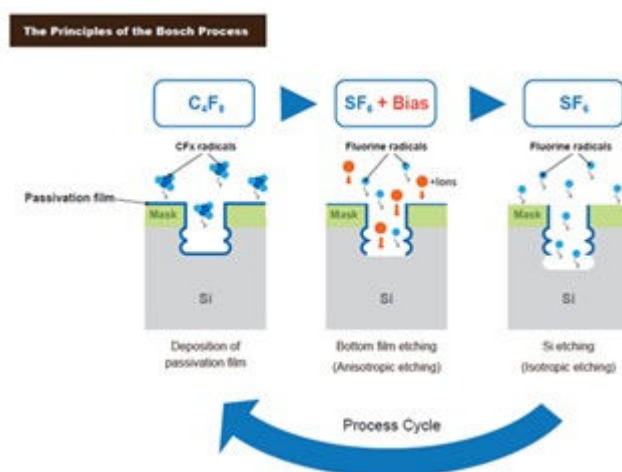


Рисунок 1 – Принцип работы *Bosch Process* [5]

Химические реакции, протекающие при выполнении *Bosch Process* представлены в таблице 1.

Шаг с нанесением обычно использует газ C_4F_8 в качестве осаждающего газа. C_4F_8 представляет собой циклическую молекулу (кольцеобразной формы), в плазме её кольцо разрывается, и она превращается в короткоцепочечную молекулу. Оба конца цепочки C_4F_8 активны. Активные части цепочки соединяются с другими молекулами, и цепочка увеличивается в длину, прикрепляясь к кремнию и образуя мембрану. Эта мембрана выполняет функцию пассивирующей плёнки на этапе травления кремния, предотвращая травление боковых стенок.

SF_6 обычно используется в качестве травильного газа для травления плёнок и кремния. SF_6 диссоциирует в плазме с образованием SF_4 или SF_2 и атомарного фтора, который вступает в реакцию с кремнием. Как SF_4 , так и продукт реакции травления, SiF_4 , существуют в виде газов, которые удаляются из камеры. SF_4 настолько стабилен, что атомы фтора не могут рекомбинировать с ним. Таким образом, может образовываться большое количество атомарного фтора, который участвует в реакции травления [5].

Таблица 1 – Химические реакции *Bosch Process* [5]

Chemical Reaction Notes for Cycle Steps (1) and (3)	
Step 1: Deposition process of passivation film. (C_4F_8 chemical reaction)	Step 3: Silicon etching process. (SF_6 chemical reaction)
1. $C_4F_8 \rightarrow -(CF_2CF_2CF_2CF_2)-$ Cyclic C_4F_8 is ring-opened with plasma and both ends become activated.  C_4F_8 Octafluorocyclobutane (RC318) CAS Number : 115-25-3 UN1976 2. $X-(CF_2)_4 \rightarrow -(CF_2)_{4x} : \text{Polymer} \downarrow$ A CF_2 polymer is generated when the ring-opened C_4F_8 molecules react with each other. The passivation film is formed when CF_2 polymers are deposited on the surface.	1. $SF_6 \rightarrow SF_4 + 2F$ or $SF_6 \rightarrow SF_2 + 2F$ SF_6 is split into chemically metastable SF_4 and two individual fluorine atoms. 2. $Si(\text{solid}) + 4F \rightarrow SiF_4 : \text{Gas} \uparrow$ Fluorine atoms react with the silicon. This is isotropic (side) etching.

CF_4 разлагается с образованием атомарного фтора в плазме. Однако реакция разложения обратима, и из CF_4 невозможно получить большое количество атомарного фтора. NF_3 азотирует поверхность кремния и предотвращает травление кремния, в результате чего скорость травления составляет примерно треть от скорости травления SF_6 .

На рисунке 2 представлены реакции, которые объясняют необходимость выполнять этапы осаждения и травления по отдельности [5].

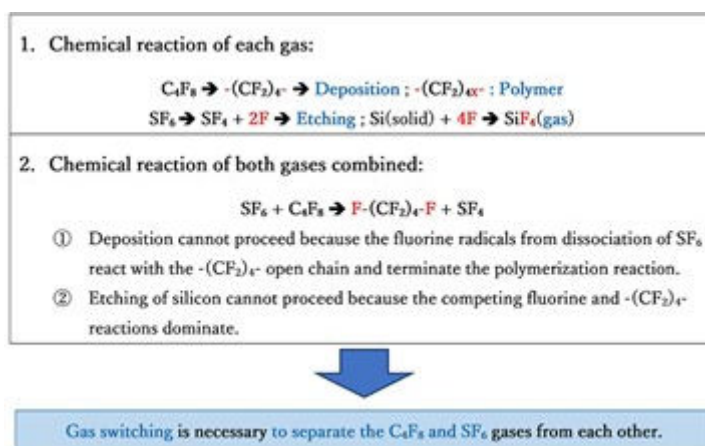


Рисунок 2 – Суть разделения этапов осаждения и травления [5]

Кольцевая структура C_4F_8 разрушается, и в плазме образуется C_4F_8 в форме цепочки. Реакция полимеризации происходит, когда $-(CF_2)_4$ -группы взаимодействуют друг с другом, образуя более длинные цепочки. Полимер образует пассивирующую пленку на поверхностях протравленных углублений. В присутствии SF_6 радикалы фтора, образующиеся в результате диссоциации SF_6 , вступают в реакцию с цепными $-(CF_2)_4$ -группами и прекращают реакцию полимеризации. Кроме того, радикалы фтора исчезают по мере того, как они расходуются в ходе реакции прекращения, и, таким образом, травление не может произойти. Таким образом, быстрое переключение газа каждые 0,1 секунды позволяет избежать смешивания газов C_4F_8 и SF_6 .

На рисунке 3 представлены профили боковых стенок, получаемые в результате выполнения *Bosch Process* [5].

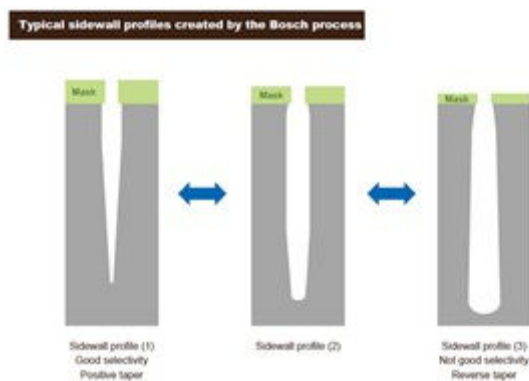


Рисунок 3 – Профили боковой стенки, получаемые при выполнении *Bosch Process* [5]

По рисунку 3 видно, что профили выглядят по-разному, а именно:

1 Профиль (1) непосредственно под маской вертикальный. Он постепенно сужается к низу.

2 Профиль (2) непосредственно под маской имеет обратную конусность. Он становится вертикальным и постепенно сужается по мере увеличения соотношения сторон или глубины травления.

3 Профиль (3) боковой стенки с обратной конусностью [5].

Заключение. Таким образом технология *Bosch Process* позволяет получать глубокие изображения селективно и с высокой скоростью обработки. Однако из-за особенностей технологического процесса возникают следующие сложности:

– на третьем шаге цикла скорость травления сильно зависит от площади отверстия в обрабатываемом материале и хуже переносятся радикалы на нижнюю поверхность такого отверстия;

– образование зазубрин на обрабатываемой поверхности и неровности из-за неравномерности распределения плазмы.

Данные проблемы решаются путём настройки оборудования и режимами обработки [5].

Список литературы

1. Плазменные технологии для обработки поверхности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://sernia.ru/training/plazmennye_tekhnologii_dlya_obrabotki_poverkhnosti/. Дата доступа: 03.03.2026.
2. Плазменное травление: Снятие оксидных слоев, фоторезиста [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.plasma.com/ru/travlenie-plazmoi/>. Дата доступа: 03.03.2026.
3. Плазменное травление (RIE, RIE-ICP, DRIE) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minateh.ru/equipment/technological/plasma-etching/>. Дата доступа: 03.03.2026.
4. Плазмохимическое травление [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gn-tech.ru/tekhnologii/plazmokhimicheskoe-travlenie/#:~:text=Плазмо-химическое%20травление%20-%20это%20передовая,плазменного%20разряда%20и%20химических%20реакций.> Дата доступа: 03.03.2026.
5. What is the Bosch Process (Deep Reactive Ion Etching)? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.samcointl.com/news-events/tutorials/what-is-the-bosch-process/>. Дата доступа: 03.03.2026.

UDC 621.7-4

REVIEW OF THE BOSCH PROCESS TECHNOLOGY AS A PLASMA-CHEMICAL ETCHING METHOD

Barkouskaya K.M.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Madveika S.I. – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of electronic technique and technology

Annotation. The technology of performing plasma-chemical etching using the Bosch Process has been reviewed. This article presents the principle of this method, as well as the features of material processing when carrying out this etching method.

Keywords: plasma, etching, plasma-chemical etching, plasma technology.

СИСТЕМА НЕЙРОСЕТЕВОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭКГ С ON-PREM ВЕБ-ШЛЮЗОМ

Ларченко Н.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Давыдов М.В. – к.т.н., доцент, первый проректор

Аннотация. Разработана система автоматической интерпретации электрокардиограмм на основе методов глубокого обучения. Система выполняет анализ сырых сигналов ЭКГ со встроенной предобработкой и формирует диагностические предположения по набору кардиологических патологий. Архитектура модели позволяет эффективно извлекать морфологические признаки сигнала и учитывать долгосрочные временные зависимости. Результатом работы алгоритма является ранжированный список наиболее вероятных диагнозов с оценками вероятности. Для повышения интерпретируемости реализована визуализация влияния различных участков сигнала на решение модели. Система развёртывается внутри инфраструктуры медицинского учреждения и предоставляет доступ к функциональности через локальный веб-шлюз.

Ключевые слова: электрокардиограмма, глубокое обучение, автоматическая интерпретация, кардиологические патологии, интерпретируемость

Введение. Электрокардиография является одним из основных инструментов диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. Анализ ЭКГ требует выявления морфологических особенностей сигнала и временных зависимостей между его элементами. В клинической практике интерпретация электрокардиограмм выполняется специалистом и зависит от его опыта и квалификации.

В последние годы методы искусственного интеллекта активно применяются для автоматизации анализа медицинских сигналов. Современные алгоритмы глубокого обучения способны выявлять сложные закономерности в данных и повышать точность диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы. Использование нейросетевых моделей в кардиологии позволяет ускорить обработку данных и снизить вероятность диагностических ошибок. Алгоритмы машинного обучения уже применяются для анализа медицинских изображений и сигналов, включая электрокардиограммы, где они демонстрируют способность обнаруживать патологические изменения, не всегда очевидные при визуальной интерпретации сигнала [1].

Одновременно развивается направление автоматизации обработки медицинских данных и интеграции интеллектуальных алгоритмов в клинические информационные системы. Такие решения позволяют ускорить анализ диагностических данных и повысить эффективность работы медицинского персонала [2]. Развитие технологий Big Data и методов анализа больших данных играет важную роль в персонализированной медицине, позволяя обрабатывать большие массивы медицинской информации и формировать индивидуальные стратегии лечения пациентов [3].

В связи с этим актуальной задачей является разработка систем автоматической интерпретации электрокардиограмм, которые могут выступать инструментом поддержки принятия решений врача.

Основная часть. Использование глубокого обучения в анализе кардиологических данных позволяет автоматически извлекать диагностически значимые признаки из сигналов ЭКГ и медицинских изображений [4]. Предлагаемая система предназначена для автоматического анализа сигналов электрокардиограммы и формирования диагностических предположений на основе методов глубокого обучения.

На вход системы поступает сырой сигнал ЭКГ. Встроенный модуль предобработки выполняет ресэмплирование и фильтрацию полосовым фильтром Баттерворта, обрабатывает

дрифт базовой линии, выполняет сглаживание. После этого проводится проверка и коррекция полярности, обработка пропусков и плоских участков, нормализация и приведение длины. В конце вычисляются простые показатели качества записи. Конвейер возвращает как сам очищенный сигнал, так и словарь с оценками его качества.

Основу системы составляет гибридная нейросетевая архитектура, объединяющая сверточные нейронные сети и механизм самовнимания трансформера. Сверточные слои используются для извлечения локальных морфологических признаков сигнала, включая форму комплексов и сегментов электрокардиограммы. Трансформерный блок анализирует долгосрочные временные зависимости между различными участками сигнала.

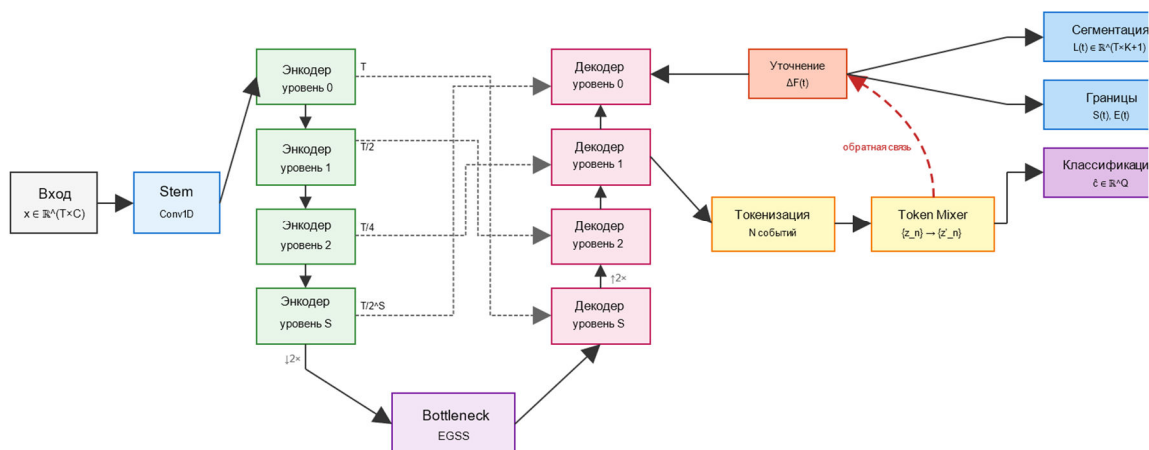


Рисунок 1 – Архитектура нейросетевой системы интерпретации ЭКГ

Современные исследования показывают, что алгоритмы искусственного интеллекта способны выявлять патологические изменения сердечной деятельности, которые могут быть трудно обнаружимы при традиционном визуальном анализе сигналов [5]. Для повышения интерпретируемости решений реализован механизм визуализации влияния различных участков сигнала на итоговое предсказание модели.

На основе анализа внутренних представлений нейросети формируется карта значимости, показывающая участки сигнала, оказавшие наибольшее влияние на диагностическое решение.

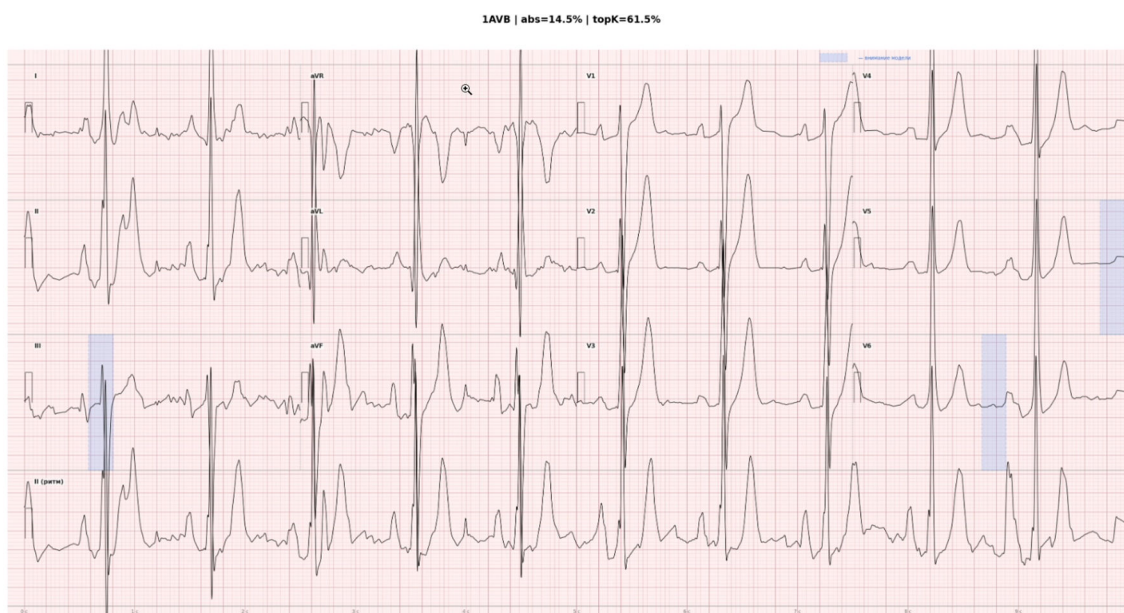


Рисунок 2 – Визуализация значимых участков сигнала ЭКГ

Такая визуализация позволяет врачу сопоставить вывод модели с морфологическими особенностями сигнала и оценить обоснованность полученного результата.

Для оценки эффективности системы была проведена серия экспериментов по диагностической интерпретации электрокардиограмм.

Качество модели оценивалось с использованием метрики top-k, при которой предсказание считается корректным, если правильный диагноз присутствует среди нескольких наиболее вероятных результатов.

Результаты экспериментов показали точность около 90 % по метрике top-3, когда система выводит три наиболее вероятных диагноза.

Дополнительно была проведена экспертная проверка результатов работы модели. Врач-кардиолог оценил корректность диагностических выводов системы. В ходе анализа было установлено, что приблизительно в 80 % случаев один из предложенных системой диагнозов совпадал с клиническим заключением специалиста.

Заключение. Разработанная система демонстрирует возможность эффективного применения методов глубокого обучения для автоматической интерпретации электрокардиограмм. Использование гибридной архитектуры CNN и трансформера позволяет учитывать как локальные морфологические признаки сигнала, так и глобальные временные зависимости.

Интеграция механизма визуализации объяснимости повышает прозрачность работы модели и облегчает взаимодействие врача с системой. Реализация локального веб-шлюза позволяет развернуть систему в инфраструктуре медицинского учреждения без передачи медицинских данных во внешние сервисы.

Предложенный подход может использоваться как основа для создания систем поддержки принятия решений в кардиологии.

Список литературы

1. Применение искусственного интеллекта в кардиологии и перспективы его дальнейшего внедрения = *Application of artificial intelligence in cardiology and prospects for its implementation* / Н. А. Ларченко, Е. А. Курлюк, М. В. Давыдов, Е. К. Курлянская // *Медэлектроника–2024. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей XIV Международной научно-технической конференции*, Минск, 5–6 декабря 2024 г. – 2024. – С. 12–16 (дата обращения: 05.03.2025).
2. Автоматизация обработки медицинских данных с использованием компьютерного зрения: подходы и перспективы внедрения в кардиологии = *Application of artificial intelligence in cardiology and prospects for its implementation* / Е. А. Курлюк, Н. А. Ларченко, М. В. Давыдов, Е. К. Курлянская // *Медэлектроника–2024. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей XIV Международной научно-технической конференции*, Минск, 5–6 декабря 2024 г. – 2024. – С. 254–259 (дата обращения: 05.03.2025).
3. Ларченко Н.А., Андриялович И.В. BIG DATA и Advanced Analytics в персонализированной медицине // *Десятая Международная научно-практическая конференция «BIG DATA and Advanced Analytics. BIG DATA и анализ высокого уровня»*, Минск, Республика Беларусь. – 2024. – С.181–186 (дата обращения: 05.03.2025).
4. Deep echocardiography: data-efficient supervised and semi-supervised deep learning towards automated diagnosis of cardiac disease / Madani, A., Ong, J.R., Tibrewal, A. et al. // *Digital Med.* – 2018. – Vol. 1, N 59. – Pp. 1-11.
5. Artificial intelligence as an emerging tool for cardiologists / Ledziński, L., Grześk, G. // *Proceedings of the 2nd International Electronic Conference on Biomedicine*, Basel, Switzerland. – 1–31 March 2023.

UDC 004.89–93:616.12-07

NEURAL NETWORK ECG INTERPRETATION SYSTEM WITH ON-PREM WEB GATEWAY

Larchenko N.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Davydov M.V. – Cand. of Sci., associate professor, first vice-chancellor

Annotation. A system for automatic interpretation of electrocardiograms based on deep learning methods has been developed. The system analyzes raw ECG signals with built-in preprocessing and generates diagnostic assumptions for a set of cardiac pathologies. The model architecture allows for effective extraction of morphological signal features and consideration of long-term temporal dependencies. The result of the algorithm is a ranked list of the most likely diagnoses with probability estimates. To improve interpretability, the influence of different signal segments on the model's decision is visualized. The system is deployed within the infrastructure of a medical institution and provides access to functionality through a local web gateway.

Keywords: ECG, deep learning, automatic interpretation, cardiac pathologies, interpretability

УДК 621.397.3–048.24:004.056.5

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ МОДУЛЬ КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Козинцова Е.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Кудина А.В. – к. т. н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. В статье рассматривается разработка программно-аппаратного контроля энергопотребления электрооборудования. Основная часть работы заключается в создании комплексного решения, которое обеспечивает сбор параметров электрической сети, хранение и передачу на системы верхнего уровня, контроль энергопотребления на основе полученных данных. Обоснована актуальность создания данного решения, а также сформулированы ключевые требования к его реализации.

Ключевые слова: программно-аппаратный модуль, управление энергопотреблением, модуль контроля энергопотребления, автоматизированные электрические сети.

Введение. Программно-аппаратный модуль контроля энергопотребления электрооборудования (далее – модуль) предназначен для непрерывного измерения, учёта и контроля параметров электрической сети и потребления электроэнергии различными электрическими нагрузками. Модуль обеспечивает сбор оперативных данных: действующее значение напряжения, действующее значение тока, активная мощность, полная мощность, коэффициент мощности, средняя мощность нагрузки. Выполняет хранение и передачу измерительной информации на системы верхнего уровня (системы диспетчеризации, автоматизированные системы учёта и управления энергопотреблением). Модуль также реализует функции защиты от перегрузки и срабатывания тревог при выходе параметров сети за заданные пределы, обеспечивает регистрацию событий и аварий, поддерживает коммуникационные интерфейсы для интеграции в энергоменеджмент и промышленную автоматику [1].

Основная часть. В данной статье рассматривается программно-аппаратный модуль для контроля энергопотребления с интегрированным измерительным трактом и коммуникационными интерфейсами. Модуль состоит из аппаратной и программной частей. Наиболее близкий аналог (прототип) программно-аппаратного устройства изображен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Устройство мониторинга электроэнергии KM50-E1-FLK

В устройстве KM50-E1-FLK отсутствует наличие встроенного Wi-Fi модуля и встроенного источника резервируемого питания [2].

Аппаратной частью выступает микроконтроллер STM32L151CCT6 от компании STMicroelectronics, относящийся к продуктовой линейке решений с низким энергопотреблением. Микроконтроллеры данной компании широко распространены и обладают большим сообществом пользователей, что очень часто помогает при возникновении неисправностей [3]. Чтобы разрабатываемый индикатор получился компактным и легким, в аппаратной части применяются компоненты типоразмера 0402. Также детектором гамма-излучения выступает счетчик Гейгера-Мюллера СБМ-21. Он характеризуется небольшими габаритными размерами: 21×6×6 мм. В корпусе расположен дисплей «LCD1602». В качестве

питания используется встроенный импульсный источник питания с режимом резервирования от *Li-Ion* аккумуляторной батареи. Передача данных осуществляется через встроенный *Wi-Fi* модуль (*Wi-Fi* 802.11 b/g/n).

Программная часть включает встроенное программное обеспечение (далее – ПО) (ПО для микроконтроллера, установленного в аппаратную часть), которое выполняет задачи управления. Встроенное ПО имеет прошивку с меню-конфигурациями, поддерживающая настройку каналов, установок, периодов архивации и коммуникационных параметров. Опрос и передача происходит в реальном времени с периодом от 1 с до 1 мин (в зависимости от конфигурации). Формируются архивы энергопотребления: суточные, почасовые, поминутные и архивы с заданным периодом сохранения. В прибор встроены часы реального времени (*RTC*) с резервным питанием для корректной метки времени. Используется объём локальной памяти от нескольких мегабайт до десятков мегабайт (возможна поддержка внешней флеш-памяти)[4]. Измеряемые величины: мгновенные значения U , I , P (активная), Q (реактивная), S (полная), частота сети, потреблённая или отданная энергия (фазная и суммарная).

Область применения охватывает предприятия промышленного, коммунально-бытового и коммерческого секторов, где требуется точный локальный контроль энергопотребления, оптимизация расхода энергетических ресурсов и интеграция в систему управления энергией (*EMS*). В промышленном производстве предполагает использование для мониторинга потребления на цеховых распределительных щитах, контроль электродвигателей и технологических агрегатов, выявление энергоёмких режимов, предотвращение перегрузок и аварий. В коммунальном хозяйстве модуль может быть предназначен для учёта и анализа потребления в многоквартирных домах, котельных, насосных станциях и на объектах уличного освещения для оптимизации графиков включения и снижения потерь. В торговых центрах, офисах, гостиницах осуществляет контроль по зонам для формирования тарифных стратегий, слежение за пиковыми нагрузками и снижение затрат. В сфере энергосбыта и распределительных сетей использование модуля обуславливает удалённый учёт на высоковольтных или низковольтных линиях – фидерах, контроль соответствия договорных мощностей, выявление хищений и несанкционированных подключений. Подходит для объектов с критичной инфраструктурой: дата-центры, больницы, где требуется оперативное оповещение о нарушениях электроснабжения и поддержка бесперебойности работы. Возможно использование в проектах энергосбережения и сертификации в качестве сбора базовой информации для энергоаудита, оценка эффективности мероприятий по энергосбережению.

Предусматривается возможность использования модуля в составе системы «умного здания» или для управления генерацией и аккумуляцией энергии, синхронизации с солнечными панелями и инверторами. Установка модуля на вводе цеха обеспечивает отдельный учёт прибыли подразделений и ограничения потребления в пиковые часы с помощью диспетчеризации. Интеграция нескольких модулей по *RS-485/Modbus* в *SCADA*-систему возможна для централизованного отображения установок, временной регистрации событий и построения отчётов по потреблению.

Основные характеристики:

- корпус для монтажа на *DIN*-рейку со степенью защиты корпуса не менее *IP20*;
- линейное напряжение питания 192...242 В *AC* (50 Гц) или вариант 24 В *DC* (в зависимости от исполнения);
- потребляемая мощность до 10...15 Вт.;
- рабочая температура от 0 °С до +55 °С;
- относительная влажность до 95% без конденсации;
- количество конфигурации измеряемых каналов от однофазного до трёхфазного (3-проводное либо 4-проводное) с возможностью расширения дополнительными входами тока;
- диапазон измеряемого напряжения от 57...400 В (фаза-фаза либо фаза-нейтраль);
- входы напряжения с гальванической развязкой или трансформаторным подключением;
- диапазон измеряемого тока от 0...5 А (для прямого подключения) и через трансформаторы тока (ТТ) – до 5/1 А на вход, поддерживаются ТТ с классом точности для нужных диапазонов (допускается подключение внешних шунтов для больших токов);
- класс точности для активной энергии не ниже 1, для напряжений и токов не ниже 0.5.

В приборе защита связи включает поддержку паролей, права доступа, шифрование каналов (дополнительная опция). Используются шины связи: RS 485 (поддержка многоточечного подключения), Ethernet 10/100Base T (дополнительная опция), USB (для настройки и локального скачивания данных). Учтена защита от перенапряжения на входах, фильтрация помех, гальваническая развязка измерительных входов, формирование цифровых сигналов аварии, релейных выходов или сообщений по сети при превышении установленных параметров. Возможны различные варианты подключения: точка к точке для локального считывания, многоточечная шина для объединения нескольких модулей, интеграция по Ethernet в корпоративную сеть. Рабочий ресурс рассчитан на длительную непрерывную эксплуатацию в промышленной среде [5].

Заключение. Разработанный программно-аппаратный модуль для контроля энергопотребления представляет собой современное решение, сочетающее компактность, энергоэффективность и удобство использования. Применение микроконтроллера STM32L151CCT6 обеспечивает удовлетворительную точность измерений при минимальном энергопотреблении и небольших габаритах устройства, что делает систему практичной для повседневного использования персоналом.

Перспективы развития системы включают интеграцию с облачными сервисами для удаленного мониторинга, применение более совершенных алгоритмов обработки данных и расширение функциональных возможностей. Учитывая обширное количество предприятий, использующих электрооборудование, данный модуль обладает значительным потенциалом для внедрения в различных отраслях – от медицины до атомной энергетики.

Таким образом, предложенное решение обеспечивает эффективный контроль энергопотребления, соответствуя современным требованиям безопасности. Его практическая ценность подтверждается актуальностью задачи, продуманной архитектурой и возможностями для дальнейшего развития.

Список литературы

1. Технология сборки электронных модулей: учебнометодическое пособие / В.Л. Ланин, А.А. Костюкевич. – Минск : БГУИР, 2018. – 88 с;
2. Устройства мониторинга электроэнергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.proenergo.ru/statyi/ustroystva-kontrolya-energopotrebleniya/?ysclid=mliaatuipo793581084> – Дата доступа: 20.02.2026 г.;
3. STM32F103C8T6 Datasheet (PDF) – STMicroelectronics [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103c8.html> – Дата доступа: 19.02.2026 г.;
4. Программирование микроконтроллеров STM32: учеб. пособие / А.А. Ключарёв, К.А. Кочин, А.А. Фоменкова. – СПб. : ГУАП, 2023. – 196 с.;
5. Телеш, Е.В. Специальное технологическое оснащение. Конспект лекций по дисциплине «Специальное технологическое оснащение» / Е.В. Телеш – Минск : БГУИР, 2007. – 202 с.

UDC 621.397.3–048.24:004.056.5

HARDWARE AND SOFTWARE MODULE FOR MONITORING ENERGY CONSUMPTION OF ELECTRICAL EQUIPMENT

Kazintsova Y.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus
Kudina A.V. – Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor of the Department of ETT

Annotation. This article discusses the development of hardware and software for monitoring the energy consumption of electrical equipment. The primary focus of the work is the creation of a comprehensive solution that collects electrical network parameters, stores and transmits them to higher-level systems, and monitors energy consumption based on the data collected. The relevance of this solution is substantiated, and key requirements for its implementation are formulated.

Keywords: Electrical equipment, energy consumption monitoring module, electrical networks, energy management, hardware and software module.

ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФ НА БАЗЕ МОДУЛЯ ADS1298ECG-FE

Протасеня И. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Лушакова М. С. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. Разработан электрокардиограф на базе оценочного модуля ADS1298ECG-FE от Texas Instruments. Устройство предназначено для сбора и анализа электрокардиографических сигналов в реальном времени с возможностью конфигурации каналов для прекордиальных отведений. Модуль обеспечивает низкий уровень шума, высокое разрешение и портативность за счет батарейного питания. Предложена методика настройки для 6-канального режима, включая программное обеспечение для визуализации данных.

Ключевые слова: электрокардиограф, ADS1298, многоканальный АЦП, портативное устройство, ЭКГ-сигналы.

Введение. В современной медицине и биомедицинской инженерии портативные электрокардиографы играют ключевую роль в диагностике сердечно-сосудистых заболеваний. Они позволяют проводить мониторинг ЭКГ в амбулаторных условиях без необходимости в стационарном оборудовании. Актуальность разработки таких устройств обусловлена ростом числа пациентов с сердечными патологиями и необходимостью доступных инструментов для ранней диагностики [1]. Для такого типа устройств актуально наличие встроенного термопринтера, что позволяет на месте получить распечатку кардиограммы и передать врачу для дальнейшего наблюдения за пациентом. Термобумага не требует чернил и сам принтер обладает компактностью и низким энергопотреблением, четкой печатью и не нуждается в подключении дополнительных модулей.

Основная часть. Данный электрокардиограф основан на оценочном модуле ADS1298ECG-FE, который включает 6-канальный 24-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) с интегрированными функциями для измерения биопотенциалов, в том числе ЭКГ-сигналов. Модуль предназначен для оценки характеристик АЦП ADS1298 в системах мониторинга пациентов портативного ЭКГ-устройства. Он обеспечивает низкий уровень шума (менее 5 мкВ пикового значения) и высокую точность, что критично для регистрации слабых биосигналов сердца.

Оценочный модуль ADS1298ECG-FE от Texas Instruments [1] является ядром устройства и представляет собой удобную платформу для создания различных прототипов, поддерживая до 8 каналов с высоким разрешением. В рамках разработки была выполнена адаптация модуля для 6-канального портативного электрокардиографа, что упрощает сборку и снижает энергопотребление. Модуль обеспечивает низкий уровень шума, высокое разрешение и портативность за счет батарейного питания. Модуль включает в себя четырехслойную печатную плату с АЦП, низковольтными регуляторами (LDO) для аналогового и цифрового питания, а также входные фильтры для подавления электромагнитных помех и антиалиасинговые фильтры. Питание может быть биполярным ($\pm 2,5$ В) или униполярным (3–5 В), с опцией батарейного источника для обеспечения портативности. Например, использование четырех элементов питания типа АА (1,5 В) обеспечивает автономность до нескольких часов работы в низкопотребляющем режиме (при короткозамкнутой перемычке JP5). Существуют разработки, также использующие данный модуль [2].

На блок-схеме (рисунок 1) показаны основные компоненты: входные электроды подключаются через разъем DB15, сигналы проходят через защитные элементы и поступают на АЦП, данные передаются по интерфейсу SPI на материнскую плату MMB0, а затем по USB на персональный компьютер. Для визуализации и обработки используется графический интерфейс пользователя (GUI), который отображает волновые формы ЭКГ, гистограммы распределения амплитуд и спектры сигналов (FFT). Программное обеспечение позволяет

применять цифровые фильтры: фильтр высоких частот (HPF) для удаления дрейфа базовой линии, фильтр низких частот (LPF) для подавления высокочастотных помех и notch-фильтр для устранения сетевой помехи 50/60 Гц.

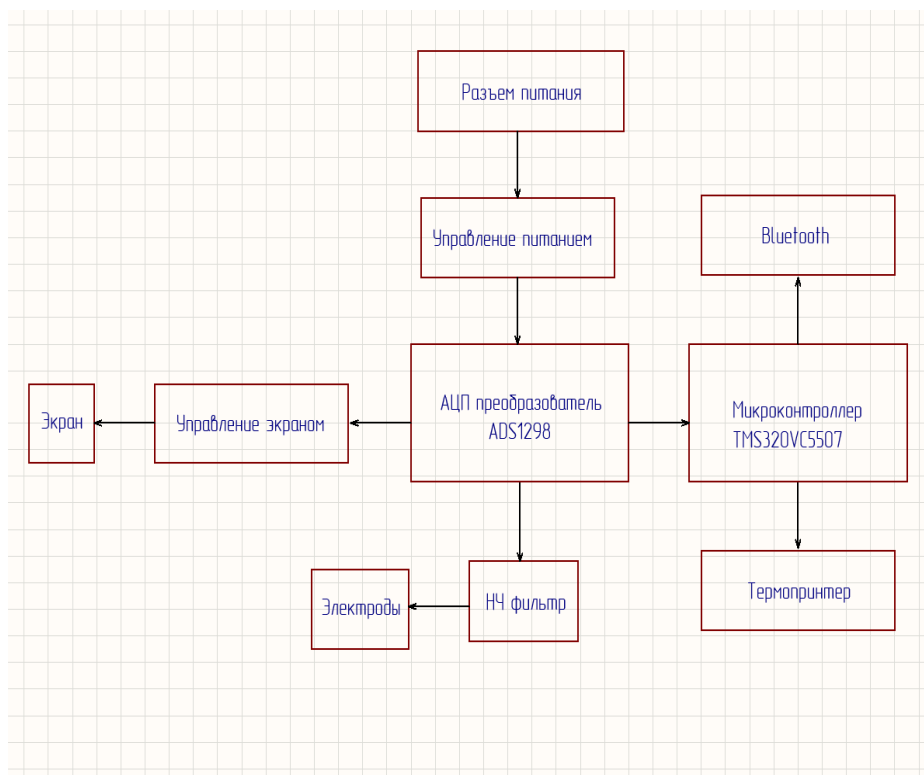


Рисунок 1 – Блок-схема прототипа электрокардиографа на базе ADS1298ECG-FE

Для конфигурации на 6 каналов используются переключки (джамперы) модуля, такие как JP26–JP33, которые позволяют подключать электроды к конкретным входам АЦП. Например, каналы настраиваются для стандартных отведений: I, II, III (биполярные) и V1–V3 (прекордиальные), с возможностью добавления усиленных отведений aVR, aVL, aVF при необходимости. Это достигается через встроенный мультиплексор (MUX) в программном обеспечении, где глобальные или индивидуальные настройки каналов выбирают режим нормального электрода или подключение к Wilson Central Terminal (WCT) для формирования центральной опорной точки. Дополнительно реализуется схема управления правой ногой (Right Leg Drive, RLD) для активного подавления помех от общего режима.

Таблица 1 – Последовательность настройки каналов для 6-канального режима

№ шага	Действие
1	Установка джамперов JP26–JP31 для подключения электродов V1–V6
2	Конфигурация мультиплексора в ПО для нормального режима электродов
3	Включение привода правой ноги и Wilson Central Terminal для снижения шумов
4	Запуск приобретения данных с частотой дискретизации 500 SPS
5	Анализ сигналов в графическом интерфейсе с сохранением результатов

В 6-канальном режиме устройство регистрирует сигналы с погрешностью менее чем 1 %, что позволяет отследить даже слабые биоритмы с высокой точностью и минимальными отклонениями. Для интеграции термопринтера (как дополнительная функция) необходимо добавить внешний модуль. В данном случае это Fujitsu FTP-628MCL103 [3]. Подключение осуществляется по интерфейсу UART к свободным выводам микроконтроллера, используемого в качестве управляющего контроллера. Данные ЭКГ-сигналов форматируются

в виде растрового изображения (битмап) и передаются на принтер с помощью библиотеки ESC/POS.

Заключение. Разработанный прототип 6-канального портативного электрокардиографа на базе ADS1298ECG-FE демонстрирует простоту адаптации оценочного модуля. Он обеспечивает сбор ЭКГ-сигналов с высоким разрешением и низким энергопотреблением, подходя для мониторинга в полевых условиях. Предложенная методика настройки каналов упрощает реализацию, а возможность батарейного питания повышает мобильность устройства. Устройство оснащено беспроводной передачей данных (Bluetooth) и встроенным термопринтером для полной функциональности. Это способствует развитию навыков в области биомедицинской электроники и может быть использовано в исследованиях сердечных заболеваний [4,5].

Список литературы

1. ADS1298, ADS1298R, ADS1198, ADS1198R Low-Power, 8-Channel, 24-Bit Analog Front-End for Biopotential Measurements [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1298.pdf>. – Date of access: 06.03.2026.
2. ADS1298ECG-FE/ADS1198ECG-FE EVM User's Guide / Texas Instruments. – Dallas: TI, 2016. – 66 p. – Mode of access: <https://www.ti.com/lit/ug/sbau171d/sbau171d.pdf>. – Date of access: 06.03.2026.
3. Seiko Instruments. LTPZ245. Thermal Printer Mechanism. Datasheet. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://seiko-instruments.de/wp-content/uploads/2023/04/ltpz245_2.pdf. – Дата доступа: 08.03.2026.
4. Alexseev, V. Approaches to the optimization of the electronic module using the research of transformation of energy of mechanical exposure / Viktor F. Alexseev, Gennady A. Piskun, Dmitriy V. Likhachevsky // Slovak international scientific journal. – 2018. – Vol. 1, N 14. – Pp. 9–27.
5. Models for predicting the reliability of integral schemes taking into account the impact of electrostatic discharge / В.Ф. Алексеев [и др.] // Slovak international scientific journal. – 2018. – Vol. 1, N 24. – Pp. 47–62.

UDC 616.12-073.97:621.3.049.77

ELECTROCARDIOGRAPH BASED ON THE ADS1298ECG-FE MODULE

Protasenia I. A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Scientific supervisor: Lushakova M. S. – Senior Lecturer at the Department of Electronic Engineering and Technology

Annotation. An electrocardiograph based on the ADS1298ECG-FE evaluation module from Texas Instruments has been developed. The device is designed for collecting and analyzing electrocardiographic signals in real time with the ability to configure channels for precordial leads. The module provides a low noise level, high resolution, and portability due to battery power supply. A method for setting up a 6-channel mode is proposed, including software for data visualization.

Keywords: electrocardiograph, ADS1298, multichannel ADC, portable device, ECG signals.

УДК 621.438:620.193.27

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭРОЗИИ ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Расчислова С.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Республика Татарстан

Научный руководитель: Зинуров В.Э. – к. т. н., доцент, заведующий кафедрой ИГ

Аннотация. В работе численно исследовано влияние эрозии твердыми частицами компрессора на удельный расход топлива газовой турбины методом сопряжённого CFD и термодинамического моделирования. Локализованная шероховатость вызывает более существенную деградацию характеристик. Установлены рост удельного расхода топлива на 0,73% и повышение температуры на входе в турбину на 21,1 К.

Ключевые слова: Газовая турбина, эрозия твердыми частицами, удельный расход топлива, вычислительная гидрогазодинамика, термодинамический цикл, численное моделирование.

Введение. Современная авиационная и энергетическая отрасль сталкивается с необходимостью обеспечения высокой надёжности и экономичности силовых установок в различных климатических условиях. Эксплуатация газотурбинных двигателей в регионах с повышенной запылённостью атмосферы создаёт существенные риски для целостности проточной части. Инородные твёрдые частицы, попадающие в тракт двигателя, способны вызывать необратимые изменения геометрии лопаточного аппарата, что приводит к нарушению газодинамической устойчивости и снижению коэффициента полезного действия. Актуальность темы обусловлена тем, что деградация аэродинамических характеристик компрессора вследствие эрозионного износа напрямую влияет на топливную эффективность и ресурс двигателя, однако количественная связь между локальным повреждением лопаток и глобальными параметрами цикла изучена недостаточно. Традиционные методы оценки износа часто рассматривают шероховатость как равномерно распределённый параметр, что не соответствует реальной физике процесса взаимодействия частиц с поверхностью. В реальности эрозия носит локализованный характер, концентрируясь в зонах наибольшего воздействия потока. Игнорирование пространственного распределения износа может приводить к существенным погрешностям при прогнозировании остаточного ресурса и планировании технического обслуживания. Эрозия, вызванная твёрдыми частицами, доказана как серьёзная угроза безопасности и надёжности работы турбины [1]. Целью данной работы является численная оценка влияния эрозии твердыми частицами на удельный расход топлива газовой турбины посредством комплексного моделирования аэродинамических и термодинамических процессов с учётом локализации зон повреждения.

Основная часть. Исследование базируется на моделировании двигателя, сконфигурированного на базе энергоэффективного агрегата, включающего вентилятор и первые две ступени компрессора низкого давления. Для прогнозирования траекторий частиц и зон эрозионного воздействия применён метод Эйлера-Лагранжа с односторонней связью фаз, что позволяет учитывать инерционные свойства частиц кварцевого песка диаметром 20–80 мкм без существенных вычислительных затрат. Модель эрозии Табакоффа-Гранта использована для определения интенсивности износа материала лопаток, после чего данные о распределении эрозии были трансформированы в карты локализованной шероховатости поверхности. Такой подход позволяет воспроизвести физику взаимодействия абразивных частиц с материалом лопаток, что критически важно для точности прогноза, особенно при учёте температурных эффектов, влияющих на свойства материала.

Термодинамический анализ деградации цикла выполнен с использованием специализированного программного кода, позволяющего варьировать параметры компрессора в соответствии с результатами расчётов потока. Сравнительный анализ трёх сценариев выявил, что неравномерное распределение износа в критических зонах оказывает

непропорционально большое влияние на потери давления. В частности, наиболее уязвимыми зонами являются передние кромки лопаток, области у втулки и периферии, где скорость взаимодействия частиц с поверхностью максимальна. Конкретные результаты показали, что для случая локализованной эрозии снижение изобэнтропического КПД компрессора достигает 10,1%, что трансформируется в рост удельного расхода топлива на 0,73% и увеличение температуры перед турбиной на 21,1 К относительно номинального режима [2].

Игнорирование пространственной локализации эрозии при оценке ресурса двигателя приводит к занижению прогноза топливных потерь. Модель равномерной шероховатости демонстрирует меньшую деградацию параметров при той же интегральной интенсивности износа, что связано с различным влиянием на пограничный слой. Локализованная шероховатость вызывает более ранний отрыв потока и утолщение пограничного слоя в критических сечениях профиля, что приводит к увеличению коэффициента сопротивления и снижению пропускной способности каскада. Это согласуется с данными о том, что даже незначительные изменения геометрии входных кромок могут существенно влиять на угол атаки и условия обтекания профиля.

Дополнительно следует отметить влияние эрозии на температурное поле двигателя. Повышение температуры на входе в турбину является следствием снижения степени повышения давления в компрессоре при сохранении требуемой тяги. Для компенсации потерь система управления двигателем увеличивает подачу топлива, что ведёт к росту температурной напряжённости лопаток турбины. Это создаёт дополнительные риски для ресурса горячей части, так как жаропрочные сплавы чувствительны к превышению рабочих температур. В долгосрочной перспективе это может привести к ускоренному ползучестному разрушению материалов и необходимости внепланового ремонта. Применение эрозионностойких покрытий способно значительно снизить потери топлива и обеспечить экономию в диапазоне 2–5% [3].

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что проблема эрозии актуальна не только для песчаных частиц, но и для других абразивных сред, включая вулканический пепел и капли влаги. Различные модели взаимодействия частиц с потоком показывают, что размер и концентрация инородных включений играют ключевую роль в формировании паттернов износа. Частицы меньшего диаметра склонны следовать за линиями тока и могут проникать глубже в проточную часть, вызывая износ последующих ступеней. В то же время крупные частицы обладают большей инерцией и воздействуют преимущественно на входные направляющие аппараты и первые рабочие колёса. Моделирование траекторий песчаных частиц в трансзвуковых ступенях вентилятора подтверждает критическую роль углов соударения и локальной геометрии в формировании зон максимального износа [4].

Важным аспектом является также влияние шероховатости на характеристики следов за лопатками. Увеличение шероховатости приводит к расширению зон пониженного импульса за каскадом, что ухудшает условия работы последующих ступеней. Это явление носит кумулятивный характер: деградация первых ступеней компрессора низкого давления влияет на параметры потока на входе в компрессор высокого давления, вызывая каскадный эффект снижения общей эффективности двигателя. Численные эксперименты подтверждают, что локализованное воздействие на первые ступени может иметь более серьёзные последствия для цикла, чем равномерный износ последних ступеней, из-за влияния на начальные параметры сжатия.

Экономическая эффективность эксплуатации газотурбинных двигателей представляет собой критический параметр, напрямую коррелирующий со степенью деградации проточной части. Выявленное увеличение удельного расхода топлива при масштабировании на совокупный парк авиационной техники обуславливает существенный рост эксплуатационных затрат. Дополнительно, зафиксированное повышение температуры рабочего тела перед турбиной приводит к сокращению межремонтного ресурса горячих частей вследствие интенсификации процессов ползучести и термическая усталость материалов. Таким образом, применение методов численного прогнозирования эрозионного износа предоставляет

возможность оптимизации стратегий технического обслуживания и целевого внедрения эрозионностойких покрытий в наиболее критических зонах лопаточного аппарата, что способствует минимизации стоимости жизненного цикла изделия.

Закключение. В результате исследования установлено, что эрозия твердыми частицами компрессора вызывает значительное ухудшение экономических характеристик газовой турбины, выражающееся в росте удельного расхода топлива и температуры рабочего тела. Установлено, что методология учёта локализованной шероховатости обеспечивает более точную оценку деградации цикла по сравнению с моделями равномерного износа. Полученные данные применимы для оптимизации графиков технического обслуживания двигателей, эксплуатируемых в аридных регионах, и имеют ценность для повышения точности прогнозов ресурса горячих частей турбины. Результаты исследования подтверждают необходимость интеграции аэродинамического и термодинамического моделирования для комплексной оценки влияния внешних факторов на эффективность газотурбинных двигателей.

Исследование выполнено в рамках гранта Академии Наук Республики Татарстан на поддержку программ развития передовых инженерных школ республиканского значения «ТурбоПИШ», соглашение 1РПИШ от 19.12.2025 г.

Список литературы

1. Zhang J., Liu H. *Effect of solid particles on performance and erosion characteristics of a high-pressure turbine* //Energy. – 2023. – Т. 272. – С. 127185.
2. Alqallaf J., Teixeira J. A. *Numerical study of effects of solid particle erosion on compressor and engine performance* //Results in Engineering. – 2022. – Т. 15. – С. 100462.
3. Bonu V., Barshilia H. C. *High-temperature solid particle erosion of aerospace components: its mitigation using advanced nanostructured coating technologies* //Coatings. – 2022. – Т. 12. – №. 12. – С. 1979.
4. Ghenaïet A. *Modeling and simulation of sand particle trajectories and erosion in a transonic fan stage* //Journal of Turbomachinery. – 2025. – Т. 147. – №. 7. – С. 071012.

UDC 621.438:620.193.27

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF SOLID PARTICLE EROSION ON THE SPECIFIC FUEL CONSUMPTION OF A GAS TURBINE

Raschislova S.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan

Zinurov V.E. – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of EG

Annotation. The paper numerically studies the effect of compressor erosion by solid particles on the specific fuel consumption of a gas turbine using coupled CFD and thermodynamic modeling. Localized roughness causes a more significant degradation of the characteristics. The specific fuel consumption increases by 0.73%, and the inlet temperature of the turbine increases by 21.1 K.

Keywords: Gas turbine, solid particle erosion, specific fuel consumption, computational fluid dynamics, thermodynamic cycle, and numerical modeling.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ВРАЧЕБНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПНЕВМОНИИ НА ОСНОВЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Кошеленков А.Н.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Дик С.К. – к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедры ИКТ

Аннотация. Экспериментально исследовано функционирование систем поддержки принятия врачебных решений (СППВР) для диагностики пневмонии на базе компактных сверточных нейронных сетей. Установлено, что алгоритмическое смещение порога классификации позволяет избежать ложноотрицательных результатов. Предложена методика визуального контроля решений нейросети при помощи алгоритма градиентного картирования (Grad-CAM).

Ключевые слова: системы поддержки принятия врачебных решений, сверточные нейронные сети, искусственный интеллект, диагностика пневмонии

Введение. Широкая область применения систем искусственного интеллекта в лучевой диагностике, построенных на базе сверточных нейронных сетей (СНС), которые имеют тенденцию выступать в роли «черного ящика», выдвигают задачу обеспечения прозрачности и интерпретируемости результатов на одно из первых мест.[1].

В данной статье автором показано, что применение методов визуализации логики ИИ повышает качество функционирования СППВР, что, в свою очередь, может предотвратить врачебные ошибки при массовом клиническом скрининге.

Основная часть. В качестве базовой архитектуры использована сверточная нейронная сеть ResNet-50, предварительно обученная на наборе данных ImageNet (метод Transfer Learning). Выбор данной модели обусловлен наличием остаточных связей, которые решают проблему затухания градиента и обеспечивают высокую эффективность извлечения признаков из медицинских изображений.

Обучение и валидация алгоритма проводились на базе открытого верифицированного набора данных Chest X-Ray Images, содержащего более 5000 рентгенограмм. Процесс подготовки данных включал нормализацию пиксельных значений и аугментацию (повороты, масштабирование) для повышения обобщающей способности модели. Классификационный блок сети был модифицирован путем добавления слоев глобального усредняющего пулинга (Global Average Pooling) и регуляризации Dropout для предотвращения переобучения.

Ключевым требованием к медицинским системам является их прозрачность. Для перевода нейросети из категории «черного ящика» в разряд объяснимого искусственного интеллекта (XAI) в программный контур интегрирован метод Grad-CAM. Данный алгоритм анализирует градиенты целевого класса, поступающие в последний сверточный слой, и формирует тепловую карту активации. Эта карта накладывается непосредственно на исходный рентгеновский снимок, подсвечивая наиболее значимые для сети пиксели. Таким образом, врач получает возможность сопоставить вывод математической модели с реальными клиническими проявлениями патологии.

Для оценки качества работы разработанной интеллектуальной системы использовались стандартные метрики бинарной классификации. Результаты тестирования на отложенной выборке приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты оценки диагностической эффективности нейросетевой модели

Наименование показателя	Вычисленное значение, %
Общая точность (Accuracy)	89,26
Чувствительность (Recall)	96,79
Специфичность (Specificity)	81,45
Прогностическая ценность положительного результата (PPV)	88,30

Анализ метрик показывает, что алгоритм обладает высокой чувствительностью (96,79%), что является критически важным параметром для скрининговых медицинских задач. Система успешно выявляет абсолютное большинство случаев заболевания, минимизируя риск пропуска пациентов с пневмонией.

Заключение. Разработана программная архитектура системы поддержки принятия врачебных решений, позволяющая осуществлять потоковую обработку рентгеновских снимков. Доказано, что интеграция алгоритмов классификации на базе ResNet-50 и методов пространственной локализации (Grad-CAM) формирует комплексный диагностический инструмент. Отсутствие скрытой логики благодаря тепловому картированию повышает уровень доверия медицинского персонала к автоматизированному анализу и делает возможным применение системы в условиях экспресс-диагностики.

Список литературы

1. Владимирский А. В., Морозов С. П. Искусственный интеллект в лучевой диагностике: основные положения и рекомендации. – М., 2022. – 112 с.
2. Selvaraju R. R. [et al.] Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-based Localization // International Journal of Computer Vision. – 2020. – Vol. 128, № 2. – P. 336–359.
3. Kermany D. S. [et al.] Identifying Medical Diagnoses and Treatable Diseases by Image-Based Deep Learning // Cell. – 2018. – Vol. 172, № 5. – P. 1122–1131.
4. Стануль А. А. Анализ эффективности применения сверточных нейронных сетей в медицине // Znanstvena misel journal. – 2019. – Vol. 1, № 35. – P. 47–60.

UDC 004.89:004.032.26:61

INTELLIGENT CLINICAL DECISION SUPPORT SYSTEM FOR PNEUMONIA DIAGNOSIS BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

Koshelenkov A.N.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Dik S.K. – Cand. of Sci.(Phys. and Math.), associate professor, Head of the Department of engineering and computer graphics

Annotation. Experimental study of the functioning of clinical decision support systems (CDSS) for diagnosing pneumonia based on compact convolutional neural networks. It was found that algorithmic shifting of the classification threshold avoids false-negative results. A method for visual control of neural network decisions using the gradient mapping algorithm (Grad-CAM) is proposed.

Keywords: clinical decision support systems, convolutional neural networks, artificial intelligence, pneumonia diagnosis

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ДИАГНОСТИКЕ ДИСФУНКЦИЙ ВНЧС

Засинец Ю.А., Хуцишвили В.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Давыдов М.В. – к. т. н., доцент, первый проректор БГУИР

Аннотация. В работе рассматривается разработка интеллектуальной системы поддержки принятия врачебных решений для диагностики дисфункций височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС). Система базируется на использовании локальной модели (LLM) Llama 3.1, интеграции базы данных медицинских показателей и разработке веб-приложения. Особое внимание уделено остеопатическим аспектам диагностики, позволяющим выявлять взаимосвязи между состоянием зубочелюстной системы и опорно-двигательного аппарата.

Ключевые слова: дисфункция ВНЧС, Llama 3.1, остеопатия, база данных, веб-приложение, интеллектуальный анализ.

Введение. Дисфункция височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС) может возникать по самым разным причинам, поэтому их так сложно диагностировать. Согласно принципам остеопатии, организм представляет собой единую биомеханическую цепь. Нарушения в одном звене (например, деформация стопы или перекос таза) неизбежно вызывают реакции в других, включая шейный отдел и ВНЧС. Врач-диагност часто сталкивается с проблемой определения первопричины патологии: является ли она восходящей (от стоп к челюсти) или нисходящей. Интеллектуальный анализ больших массивов данных позволяет автоматизировать поиск этих скрытых связей.

Основная часть. Для реализации системы была спроектирована специализированная база данных (БД), аккумулирующая результаты комплексного обследования. В БД хранятся данные о пациентах (ФИО, возраст и регион), также хранятся данные обследований. К ним относятся: осмотр стоматологический, результаты ультразвуковых исследований (УЗИ), электромиографии (ЭМГ), электроэнцефалографии (ЭЭГ), показатели подометрии (анализ стоп) и остеопатическое тестирование. Локальное хранение данных на собственном сервере обеспечивает полную безопасность персональной информации пациентов и высокую скорость обработки запросов нейросетью без обращения к облачным сервисам.

Ядром системы выступает локальная нейросеть Llama 3.1. С помощью специальной инструкции (System Prompt) мы настроили модель как эксперта, обладающего знаниями в области биомеханики и остеопатии.

В процессе работы Llama 3.1 выполняет «маппинг» – сопоставление векторов различных патологий. Например, обнаружив в базе данных «выраженную пронацию стопы», система автоматически анализирует данные ЭМГ жевательных мышц на предмет асимметрии. Это позволяет реализовать целостный взгляд на здоровье, выявляя, является ли проблема восходящей или нисходящей.

Для удобного взаимодействия врача и пациента было разработано кроссплатформенное веб-приложение. Оно включает в себя:

Интерфейс врача: удобный дашборд с визуализацией графиков активности мышц и результатами тестов. Здесь же выводятся подсказки от нейросети в формате JSON, указывающие на наиболее вероятную причину дисфункции.

М

MedDoc Pro

Регистрация врача в системе

ФИО Врача

Иванов Иван Иванович

Специализация

Невролог

+
Зарегистрироваться и войти

Вернуться к выбору врача

М

Добро пожаловать

Выберите врача для входа

Заси

Невролог

→

Хуци

Хирург

→

+ Добавить нового врача

Рисунок 1 – Интерфейс врача при входе в веб-приложение

М

MedDoc Pro

ПАЦИЕНТЫ

👤
База пациентов

+
Новый пациент

ИНСТРУМЕНТЫ

📊
Аналитика

📊
Аналитика (Демо)

⚙️
Настройки и Данные

Реестр пациентов

🔍 Поиск по имени или региону...

А	Д.Р: 16.10.1999	Женский	>
Б	Д.Р: 21.06.1989	Женский	>
Б	Д.Р: 22.02.1998	Женский	>
Б	Д.Р: 29.11.1991	Мужской	>
Б	Д.Р: 03.02.2000	Женский	>
Б	Д.Р: 07.08.2002	Женский	>
Б	Д.Р: 21.01.1976	Женский	>

Врач

Невролог

→

Рисунок 2 – Интерфейс врача при входе в приложение

Дашборд пациента: В личном кабинете реализовано окно интеллектуального анализа. В нем отображаются результаты сравнения паттернов из разных источников (ЭМГ, УЗИ, Постурография). Система визуально разделяет выявленные патологии на восходящие (идущие от стоп) и нисходящие (идущие от прикуса). Врач получает готовый список потенциальных причинно-следственных связей, которые могли быть упущены при ручном анализе.

Редактирование пациента:

Отмена Сохранить

Удалить пациента Новый визит

Возраст: 26 лет Дата рождения: 16 октября 1999 г. Пол: Женский

ФИО пациента

Архипова Владислава Сергеевна

Дата рождения

16.10.1999

Пол

☐ Мужской ☒ Женский

История визитов (3)

15 декабря 2025 г.

Провел: Засинец Юлия Андреевна

Консультативное заключение (Невролог)

Пациент: Архипова Владислава Сергеевна, 26 лет **Дата консультации:** 27.11.2025 **Врач:** Засинец Юлия...

Редактировать

25 ноября 2025 г.

Провел: Хуцишвили Владислав Александрович

Предварительное консультативное заключение **Врач:** Хуцишвили Владислав Александрович (Хирург) **Дата анализа данных:** 2025-11-25 **Анализ пре...

Редактировать

25 ноября 2025 г.

Провел: Засинец Юлия Андреевна

Заключение не добавлено.

Редактировать

Рисунок 3 – Интерфейс пациента

Разработанная система на базе Llama 3.1 решает главную проблему диагностики ВНЧС – информационную перегрузку врача.

Заключение. Объединение принципов остеопатии с возможностями искусственного интеллекта позволяет не просто фиксировать симптомы, а находить истинную причину заболевания в сложной цепи «стопа – позвоночник – челюсть». Это ускоряет анализ карты пациента и повышает точность первичной диагностики.

Список литературы

1. Давыдов, М. В. Интеллектуальные информационные технологии в медицинских диагностических системах: учеб. пособие / М. В. Давыдов – Минск: БГУИР, 2018. – 144 с.
2. Потапов, И.В. Искусственный интеллект в стоматологии: состояние и перспективы: научн. статья / И.В. Потапов, С.А. Гаврилова – Изд-во «Стоматология для всех», 2022 – 8 с.
3. Machado, M., Ribeiro, A. (2024). Decision Support Systems in Temporomandibular Joint Osteoarthritis: A review of Data Science and Artificial Intelligence Applications. *Journal of Personalized Medicine*, 14(2), 154.

UDC 616.724–07:004.89

INTELLECTUAL DECISION SUPPORT SYSTEM FOR DIAGNOSING TMJ DYSFUNCTIONS

Zasinetz J.A., Khutsyshvili V.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Davydov M.V. – Cand. of Sci, Associate Professor, First Vice-Rector of BSUIR

Annotation. The study discusses the development of an intellectual clinical decision support system designed for the diagnosis of temporomandibular joint (TMJ) dysfunctions. The system is based on the integration of a local large language model (LLM), specifically Llama 3.1, with a comprehensive database of medical parameters and a dedicated web application. Particular emphasis is placed on osteopathic diagnostic aspects, which enable the identification of functional correlations between the stomatognathic system and the musculoskeletal system. The system facilitates the automated analysis of complex data (EMG, podometry, etc.) to determine whether the pathology is «ascending» or «descending» in nature.

Keywords: TMJ dysfunction, Llama 3.1, osteopathy, database, web application, intelligent analysis, decision support system.

РАЗРАБОТКА «БРЕЙН-СИСТЕМЫ» ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИГР

Савченко М.Е.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к.т.н., доцент, зав. кафедры ЭТТ

Аннотация. Статья посвящена созданию бюджетного устройства для проведения интеллектуальных игр («Брейн-ринг», «Эрудит-квартет»). Система на базе ArduinoUno включает центральный блок и четыре выносные кнопки со светодиодами. Описаны выбор компонентов, режимы работы, процесс сборки и программирования. Разработанное устройство отличается низкой себестоимостью и ремонтопригодностью.

Ключевые слова: интеллектуальные игры, Arduino Uno, электронное устройство, микроконтроллер.

Введение. В последние годы наблюдается устойчивый рост популярности интеллектуальных игр, таких как «Что? Где? Когда?», «Брейн-ринг» и «Эрудит-квартет» [1]. Для обеспечения тренировочного процесса и проведения соревнований подобного формата требуется специализированное оборудование. В связи с этим была поставлена задача разработки и изготовления функционального устройства для игр, отвечающего требованиям минимальных финансовых затрат при сохранении необходимого функционала. Задача системы – помощь в тренировке реакции, а также облегчении игрового процесса как для игроков, так и для ведущего. Благодаря возможности легко переключать режимы система должна быть интуитивно понятна в освоении, а также не требовать особой сложности в транспортировке.

Основная часть. Разрабатываемая система (далее – «Брейн-система») представляет собой электронное устройство, конструктивно состоящее из центрального блока и четырех выносных игровых пультов – кнопок. Ключевым требованием к системе является возможность функционирования в двух основных режимах, определяемых форматом игры: режим 1 и режим 2. Режим 1 («Брейн-ринг») предназначен для состязания двух команд. Фиксация ответа происходит по факту нажатия на кнопку после разрешающего сигнала ведущего. Режим 2 («Эрудит-квартет») предназначен для индивидуальной игры четырех участников. Игроки производят нажатие на кнопку по мере готовности дать ответ.

В обоих режимах нажатие на любую из кнопок должно сопровождаться генерацией звукового сигнала, а также индикацией путем включения светодиода, расположенного как на соответствующей выносной кнопке игрока, так и на центральном блоке управления.

В качестве аппаратной основы проекта была выбрана платформа Arduino Uno, что обусловлено ее простотой, доступностью и наличием всех необходимых интерфейсов ввода-вывода. Архитектура устройства не предполагает работы со сложными протоколами передачи данных, поэтому задача свелась к прямому подключению периферийных компонентов к цифровым и аналоговым выводам микроконтроллера. Питание платы осуществляется от внешнего источника, например, портативного аккумулятора (Power bank) или USB-порта персонального компьютера.

Для реализации проекта была использована следующая элементная база:

- кнопки;
- восемь токоограничивающих резисторов номиналом 300 Ом;
- два стягивающих резистора номиналом 10 кОм для корректной обработки сигналов с кнопок «Старт» и «Сброс»;
- восемь розеток типа 4P4C;
- клавишный переключатель для выбора режима работы устройства;
- динамик;
- телефонные кабели с вилкой типа 4P4C;

- 8 светодиодов;
- Arduino Uno;
- USB-кабель для питания платы;
- распаечные коробки.

Структурная схема проекта представлена на рисунке 1 [2].

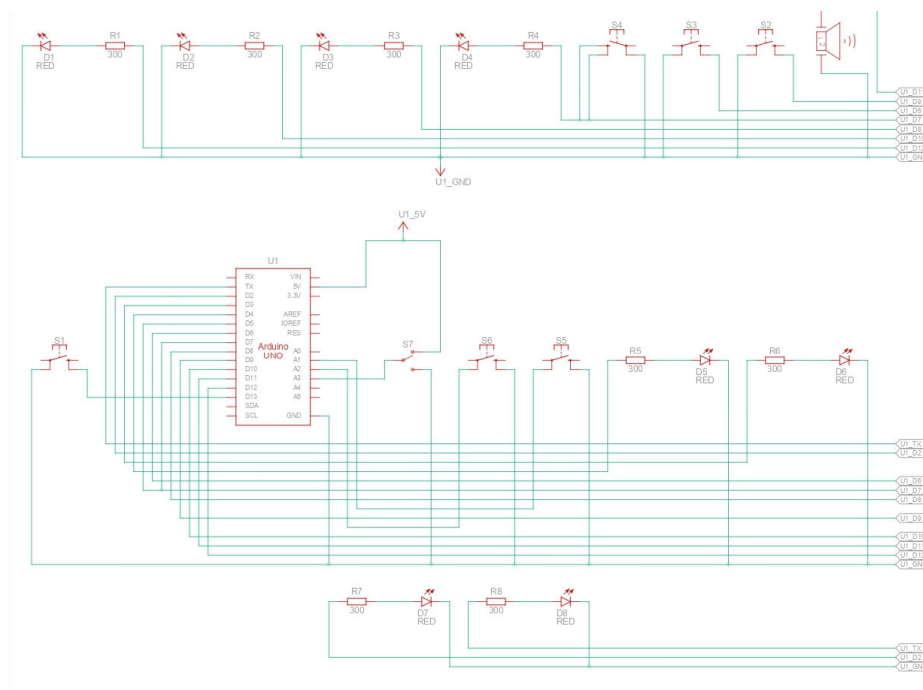


Рисунок 1 – Схема проекта

На этапе проектирования была собрана тестовая схема на макетной плате. Параллельно велась разработка управляющей программы или скетча для микроконтроллера. Программирование осуществлялось в официальной среде разработки Arduino IDE. Скетч должен был обеспечить корректную обработку сигналов в условиях «дребезга» контактов. При нажатии на механическую кнопку в цепи возникают кратковременные хаотичные изменения напряжения, которые микроконтроллер может воспринять как множество ложных срабатываний. Для исключения этого явления в программном коде была реализована функция антидребезга, использующая временную задержку для стабилизации сигнала. Длительность задержки (около 50-100 мс) была подобрана экспериментально для обеспечения компромисса между помехоустойчивостью и скоростью реакции системы. Алгоритм работы в режиме «Брейн-ринг» построен на приоритетах. После команды ведущего программа непрерывно опрашивает состояния кнопок. Первое же зафиксированное нажатие блокирует опрос остальных каналов, зажигает соответствующий светодиод на центральном блоке и выносном пульте, а также активирует звуковую индикацию. Микроконтроллер игнорирует последующие нажатия до тех пор, пока ведущий не произведет сброс состояния системы специальной кнопкой «Сброс». В режиме «Эрудит-квартет» алгоритм работает аналогично, но блокировка наступает только по факту нажатия любого из четырех участников без внешнего разрешающего сигнала.

В качестве корпуса для центрального блока была использована распаечная коробка габаритами 150×110×70 мм. В корпусе были выполнены технологические отверстия для вывода кабеля питания Arduino, монтажа светодиодов, управляющих кнопок, разъемов для подключения выносных пультов, динамика и переключателя режимов.

Корпусами для выносных кнопок послужили малогабаритные монтажные коробки. В каждом из них были проделаны отверстия под тактовую кнопку, сигнальный светодиод и ответную часть разъема для соединения с центральным блоком.

Особое внимание при разработке уделялось удобству использования устройства, а также надежности соединений. Поскольку система предполагает активное использование игроками, все внешние соединения должны выдерживать механические нагрузки.

Выбор разъемов типа 4P4C и соответствующих телефонных кабелей был обусловлен несколькими факторами. Во-первых, такие кабели и разъемы широко распространены и имеют низкую стоимость. Во-вторых, конструкция вилки 4P4C с фиксирующей защелкой обеспечивает надежное удержание в розетке и предотвращает самопроизвольное отключение пульта во время игры, что могло бы привести к спорной ситуации. В-третьих, многожильная структура телефонного кабеля устойчива к частым перегибам. Также важно было учитывать длину провода – она составила 2 метра.

При монтаже выносных пультов на базе малогабаритных монтажных коробок было предусмотрено эргономичное расположение элементов. Тактовая кнопка большого размера установлена в центре верхней крышки, что обеспечивает удобство и быстроту нажатия. Сигнальный светодиод размещен рядом с кнопкой, чтобы игрок мог визуально подтвердить факт регистрации своего нажатия, не отвлекаясь на центральный блок. Расположение элементов на центральном блоке обусловлено удобством для нажатия кнопок «Старт» и «Сброс» ведущим. Для устойчивости корпуса на гладкой поверхности на дно коробки были приклеены резиновые ножки, предотвращающие скольжение. Такая компоновка делает использование устройства интуитивно понятным и исключает ошибочные действия при подключении.

Заключение. В результате проделанной работы была успешно решена основная задача исследования: создано устройство, себестоимость которого значительно ниже рыночных аналогов. Изготовленная Брейн-система эргономична и функциональна: она работает в заданных режимах, обеспечивает комфортный игровой процесс, понятна в освоении и удобна в транспортировке. Система может работать от батареек, что также обеспечивает удобство использования. Модульная конструкция и применение разборных корпусов обеспечивают ремонтпригодность устройства. Распаечная коробка имеет съёмную крышку с винтовыми креплениями, поэтому в случае возникновения неисправностей корпус может быть демонтирован для диагностики и замены вышедших из строя компонентов.

Список литературы

1. Козлова О., Бардиян М. Брейн-система [Электронный ресурс] // Хабр Q&A: сайт. 25.05.2016. Режим доступа: <https://www.pvsm.ru/arduino/121913#begin>. Дата доступа: 04.03.2026.
2. Брейн-система для клуба интеллектуальных игр [Электронный ресурс] // Tinkercad. Режим доступа: <https://www.tinkercad.com/things/g1rf1VTLFuQ-exquisite-sango/editel?returnTo=https%3A%2F%2Fwww.tinkercad.com%2Fdashboard>. Дата доступа: 07.03.2026.

UDC004.3'144:793.7

DEVELOPMENT OF A «BRAIN-SYSTEM» FOR INTELLECTUAL GAMES

Savchenko M.E.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Madveyko S.I. – Cand. of Sci., associate professor, head of the department of ETT

Annotation. The article is devoted to the creation of a low-cost device for conducting intellectual games («Brain-Ring», «Erudite-Quartet»). The system based on the Arduino Uno includes a central unit and four remote buttons with LEDs. The article describes the selection of components, operating modes, assembly process, and programming. The developed device is characterized by low cost and maintainability.

Keywords: intellectual games, Arduino Uno, electronic device, microcontroller.

ЭФФЕКТ ПАМЯТИ ФОРМЫ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВАХ И ЕГО МЕДИЦИНСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Левоненко Ю.И., Медюха А.Е.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Шахлевич Г.М. – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. Рассмотрена природа эффекта памяти формы в металлических сплавах на примере никелида титана. Описан физический механизм явления, основанный на обратимом мартенситном превращении. Проанализировано сочетание биоинертности, сверхэластичности и способности к восстановлению формы, обуславливающее использование этих материалов в травматологии, сердечно-сосудистой хирургии и стоматологии для создания малотравматичных имплантатов и хирургических инструментов нового поколения.

Ключевые слова: эффект памяти формы, материалы с памятью формы, никелид титана.

Введение. Материалы с памятью формы (далее МПФ) представляют собой класс «умных» материалов, способных после значительной деформации возвращаться к своей первоначальной геометрии при воздействии внешнего стимула, обычно под воздействием температуры. Этот уникальный феномен, открывает широкие перспективы для различных отраслей техники и, особенно, для медицины.

Способность материала изменять форму в заданный момент времени позволяет создавать самоустанавливающиеся импланты, малотравматичные хирургические инструменты и интеллектуальные системы фиксации, которые адаптируются к процессам заживления в организме.

Основная часть. Эффект памяти формы (далее ЭПФ) не является универсальным для всех веществ, а реализуется благодаря специфическим структурно-фазовым превращениям.

В металлических сплавах, наиболее известным из которых является $NiTi$ (никелид титана), ЭПФ основан на обратимом мартенситном превращении – сдвигом бездиффузионном фазовом переходе между высокотемпературной фазой (аустенит) и низкотемпературной фазой (мартенсит). На рисунке 1 представлена схема, иллюстрирующая данный процесс на примере деформирования стержня.[1]

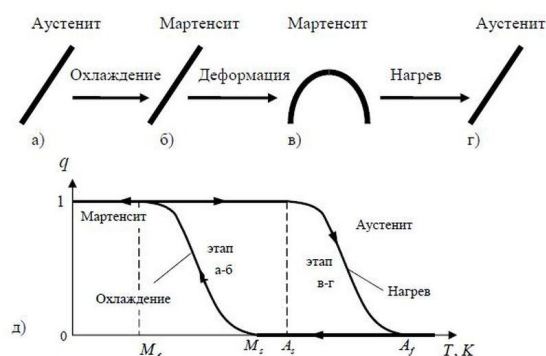


Рисунок 1 – Схема деформирования стержня с ЭПФ

Процесс реализации эффекта включает следующие этапы:

- 1 Деформация в мартенситном состоянии.
- 2 Нагрев и обратное превращение.

При низкой температуре сплав находится в фазе мартенсита, которая характеризуется множеством кристаллографических вариантов (двойников). Приложение механической нагрузки приводит к переориентации этих вариантов – росту одних за счет других. Это явление называется двойникованием и позволяет материалу выдерживать значительные деформации, не вызывая необратимого скольжения дислокаций (пластической деформации). После снятия нагрузки деформация сохраняется, так как состояние является метастабильным.[1]

При нагреве выше температуры аустенитного превращения начинается обратный фазовый переход. Кристаллическая решетка из тетрагональной или ромбоэдрической (мартенсит) перестраивается в высокосимметричную кубическую (аустенит). Поскольку в аустените существует только одно энергетически выгодное расположение атомов, материал неизбежно возвращается к своей первоначальной «запомненной» форме. В ходе этого восстановления генерируются значительные усилия, что и используется в актуаторах и фиксаторах.

Помимо ЭПФ, при деформации в высокотемпературном состоянии сплавы *NiTi* проявляют суперэластичность, возвращаясь к исходной форме сразу после снятия нагрузки.

Уникальные свойства МПФ нашли востребованное применение в медицине, где требуется малотравматичная имплантация и последующая надежная фиксация. Ключевым преимуществом применения нитинола в медицине является его уникальная биосовместимость, обусловленная формированием на поверхности импланта устойчивой инертной оксидной пленки (TiO_2). Эта пленка эффективно пассивирует материал, предотвращая выход токсичных ионов никеля в окружающие ткани и обеспечивая высокую коррозионную стойкость в агрессивной среде организма. Более того, модуль упругости *NiTi*, благодаря эффекту сверхэластичности, максимально приближен к модулю упругости костной ткани среди всех металлических имплантационных материалов. Это уникальное механическое поведение наглядно проиллюстрировано на рисунке 1. [2]

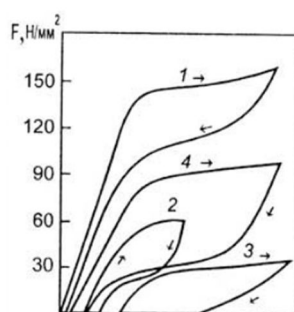


Рисунок 1 – Диаграмма деформации биологических материалов: 1 – волос, 2 – кость, 3 – мягкая ткань, 4 – *NiTi*

Как видно из диаграммы, представленной на рисунке 1, биологические материалы (волосы, кость, мягкая ткань) демонстрируют нелинейное поведение при нагрузке. Ключевое преимущество никелида титана заключается в том, что его кривая деформации (4) практически повторяет гистерезисное поведение живых тканей. Это свойство, известное как псевдоупругость, позволяет импланту деформироваться вместе с костью или мягкими тканями, не повреждая их и не создавая зон патологического напряжения, что является фундаментальным условием для физиологической регенерации.

Благодаря уникальному сочетанию эффекта памяти формы и сверхэластичности, никелид титана нашел широкое клиническое применение в различных областях медицины. В травматологии и ортопедии из него изготавливают самофиксирующиеся скобы и пластины для остеосинтеза. Имплант вводят в деформированном состоянии, а при нагреве до температуры тела он восстанавливает форму, создавая стабильную компрессию костных отломков на протяжении всего периода заживления.[2]

В сердечно-сосудистой хирургии ключевым продуктом стали самораскрывающиеся стенты. Стенты доставляются в сжатом виде к месту сужения артерии, они раскрываются до заданной формы, восстанавливая кровоток и работая в физиологическом режиме благодаря сверхэластичности материала.[3]

В стоматологии сверхэластичные ортодонтические дуги из *NiTi* обеспечивают постоянное, но щадящее усилие на зубы на всем протяжении их перемещения, что делает лечение более комфортным и сокращает его сроки.

А также в хирургической практике никелид титана применяется для создания активных пинцетов и зажимов при лапароскопических операциях. Благодаря эффекту памяти формы, рабочие инструменты из трубок *NiTi*, которые могут изменять угол захвата при нагреве электрическим током прямо во время операции. Это позволяет хирургу манипулировать тканями в труднодоступных местах с большей точностью и меньшей травматичностью. Кроме того, сверхэластичность материала обеспечивает постоянное, но щадящее усилие захвата, не повреждая биологические ткани.

Во всех этих случаях – будь то имплант, работающий внутри организма, или инструмент в руках хирурга – никелид титана выступает не просто как пассивный материал, а как функциональный элемент, способный адаптироваться к биомеханике живых тканей, минимизировать риск повреждений и обеспечить долговременную эффективность лечения.

Заключение. Материалы с памятью формы стали настоящим мостом между физикой и медициной. Благодаря пониманию того, как работают мартенситные превращения в металлах, удалось создать импланты, которые умеют подстраиваться под организм. И чем глубже понимание их природы, тем больше возможностей открывается для медицины будущего. Дальнейшее развитие этого направления связано с поиском новых биосовместимых сплавов, расширением температурного срабатывания и разработкой композитных материалов, способных реагировать не только на температуру, но и на магнитные поля или электрический ток непосредственно в организме пациента.

Список литературы

1. Место конструкций из никелида титана в лечении травм и заболеваний опорно-двигательной системы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/mesto-konstruktsiy-iz-nikelida-titana-v-lechenii-travm-i-zabolevaniy-oporno-dvigatelnoy-sistemy/viewer>. Дата доступа: 05.03.2026
2. Наука и жизнь, живой протез в живой ткани [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://m.nkj.ru/archive/articles/10001/?ysclid=mmdaazsqry218190330>. Дата доступа: 05.03.2026
3. Применение сплавов с памятью формы в медицине [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/304053124_PRIMENENIE_SPLAVOV_S_PAMATU_FORMY_V_MEDICINE. Дата доступа: 05.03.2026

UDC 620.22:615.465

THE SHAPE MEMORY EFFECT IN METAL ALLOYS AND ITS MEDICAL APPLICATION

Liavonenko Y.I., Mediukha A.Y.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Shakhlevich G.M. – Cand. of Sci. (Phys. And Math.), associate professor, associate professor of the department of ETT

Annotation. The nature of the shape memory effect in metal alloys is considered on the example of titanium nickelide. The physical mechanism of the phenomenon based on the reversible martensitic transformation is described. The combination of bioinertness, superelasticity and the ability to restore the shape, which determines the use of these materials in traumatology, cardiovascular surgery and dentistry for the creation of low-traumatic implants and surgical instruments of the new generation, is analyzed.

Keywords: shape memory effect, shape memory materials, nickel-titanium.

ВЫРАЩИВАНИЯ АЛМАЗНЫХ ПОДЛОЖЕК МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Полубок А. В., Москаленко К. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Полубок В. А. – к. т. н., доцент, доцент каф. МПСС ИИТ БГУИР
Позняк А. А. – к. ф-м. н., доцент, доцент каф. ЭТТ

Аннотация. В статье кратко рассмотрен метод химического осаждения из газовой фазы (CVD) для синтеза алмазных подложек. Определены главные проблемы в создании больших монокристаллических алмазных структур. Изучены технологические особенности гетероэпитаксиального роста и модификация путём введения примесей в процессе синтезе. Подчёркивается важность контроля за строением кристаллической решётки в процессе выращивания.

Ключевые слова: алмаз, CVD, подложки, гетероэпитаксия, монокристаллические плёнки, легирование, качество кристаллов.

Введение. Введение. Современной микроэлектронике требуются материалы с экстремальными характеристиками. Традиционный кремний (ширина запрещённой зоны 1,12 эВ) имеет фундаментальные ограничения по термостабильности и электрической прочности, что затрудняет его эксплуатацию в условиях высоких температур и напряжений [1]. Алмаз обладает уникальными параметрами: шириной запрещённой зоны 5,47 эВ, теплопроводностью до 22 Вт/см·К и пробивным напряжением до 10 МВ/см [1, 2]. Эти показатели превосходят аналогичные показатели *SiC* и *GaN*, делая алмаз перспективным для силовой электроники и детекторов радиации.

Ввиду отсутствия пригодных для серийного производства природных аналогов, основным методом получения высококачественных монокристаллов алмаза является искусственное выращивание методом химического осаждения из газовой фазы (*chemical vapor deposition* (CVD)) [3]. Для реализации высоких эксплуатационных характеристик критически важно совершенство кристаллической решётки: плотность дислокаций в материале не должна превышать 10^3 см^{-2} [4].

Основная часть. CVD представляет собой основной метод синтеза алмазных подложек. Процесс основан на разложении смеси метана (1–5%) и водорода (95–99%) в микроволновой плазме при температуре 700–900 °С и давлении 20–200 мбар [4]. Активированные радикалы углерода осаждаются на подложку со скоростью роста 1–10 мкм/ч [4].

Ключевой проблемой является выращивание монокристаллических плёнок большой площади. Чаще формируются поликристаллы, чьи границы зёрен создают центры рассеяния носителей заряда и снижают электрофизические характеристики материала [4]. Решением служит гетероэпитаксиальный рост на ориентированных буферных слоях, например иридиевых плёнках на кремнии.

Кристаллическая решётка иридия близка по параметрам к решётке алмаза, что способствует эпитаксиальному росту, а ориентация подложки (001) задаёт направление роста слоёв.

Для обеспечения высокой плотности зародышей в процессе осаждения применяется специальный этап усиленной ионной нуклеации (*Bias Enhanced Nucleation*): подача отрицательного смещения на подложку в плазме позволяет создать центры нуклеации с плотностью до 10^{10} см^{-2} [4]. Когда зародышей много, они быстро соединяются в единый слой, уменьшая число дефектов на стыках. Это даёт возможность растить плёнку нужной толщины, сохраняя её внутреннюю структуру почти идеальной (рисунок 1). Для электроники это значит

одно: приборы на такой подложке будут работать стабильнее и дольше. Особенно выигрывают от этого силовые устройства, которые часто страдают от перегрева и высоких напряжений.

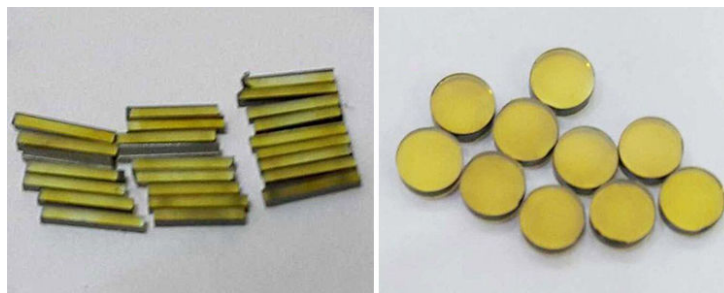


Рисунок 1 - Монокристаллические алмазные пластины, выращенная методом CVD

Важный аспект – легирование. Алмаз сложно легировать примесью, обуславливающую *n*-тип проводимости: уровень фосфора залегает на глубине $\sim 0,6$ эВ, что даёт низкую концентрацию электронов при 300 К [4]. Бор (*p*-тип) с уровнем 0,37 эВ позволяет достигать концентрации до 10^{21} см⁻³ при соотношении В/С в газовой фазе 100–1000 *ppm* [5]. Отсутствие эффективного *n*-донора осложняет создание *CMOS*-структур [5].

Заключение. Развитие *CVD*-технологий критически важно для получения качественных алмазных подложек.

Алмаз не заменит кремний в массовом производстве, но займёт нишу экстремальной электроники: силовые ключи, радиационно-стойкие детекторы, СВЧ-приборы. Прогнозируется снижение стоимости подложек на 40–50% к 2030 году при масштабировании производства.

Список литературы

1. Миллер, А. В. Широкозонные полупроводники для силовой электроники: учебное пособие / А. В. Миллер. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 150 с
2. Трапезникова, И. Н. Алмазные приборы силовой электроники / И. Н. Трапезникова // Электронные компоненты. – 2022. – № 4. – С. 30–35.
3. Ральченко, В. Г. Алмазные пленки, синтезированные методом CVD: свойства и применения / В. Г. Ральченко // Успехи физических наук. – 2022. – Т. 192, № 5. – С. 515–530
4. Schreck, M. Heteroepitaxial growth of diamond / M. Schreck // MRS Bulletin. – 2014. – Vol. 39, No 2. – Pp. 130–136.
5. Kasu, M. N-type diamond growth and its application to electronic devices / M. Kasu // Diamond & Related Materials. – 2018. – Vol. 89. – Pp. 1–7

UDC 549.211:621.38

CHEMICAL VAPOR DEPOSITION OF SINGLE-CRYSTAL DIAMOND SUBSTRATES

Polubok A. V., Moskalenko K. A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Polubok V. A. – Cand. of Sci., docent, associate professor of the department MPSN IIT BSUIR

Poznyak A. A. – Cand. of Sci., docent, associate professor of the department ETT

Annotation. The article analyzes in detail the chemical vapor deposition (CVD) method for the synthesis of diamond substrates. The main problems in creating large single-crystal structures are identified. The technological features of heteroepitaxial growth and the modification of properties by adding impurities during synthesis are studied. The importance of controlling the crystal lattice structure during the growth process is emphasized.

Keywords: diamond, CVD, wide-bandgap semiconductors, power electronics, doping, radiation detectors

ПРОБЛЕМЫ СБОРА ДАННЫХ О КАЧЕСТВЕ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Новиков Д.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Ревинская И.И. – старший преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы сбора данных о качестве атмосферного воздуха, возникающие при модернизации сети наблюдений в рамках проектов международной технической помощи. Новое оборудование поставляется с программным обеспечением, которое не соответствует требованиям национальных нормативных документов по периодам усреднения и не интегрируется в существующие информационные системы. Предлагаются методы решения, основанные на разработке отечественного программного обеспечения, адаптированного к местным условиям и обеспечивающего автоматическую валидацию данных и их передачу в системы РИСАМОС и АС Паве́тра.

Ключевые слова: мониторинг атмосферного воздуха, международная техническая помощь, газоанализаторы *HORIBA*, *Derenda APM-2*, сбор данных, РИСАМОС, АС Паве́тра.

Введение. Качество атмосферного воздуха является одним из ключевых факторов, определяющих здоровье населения. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, загрязнение воздуха ежегодно становится причиной 7 миллионов преждевременных смертей в мире. В Республике Беларусь действует система государственного мониторинга атмосферного воздуха Национальной системы мониторинга окружающей среды, включающая сеть стационарных пунктов наблюдения в промышленных городах республики.

В рамках проектов международной технической помощи осуществляется поэтапное обновление и расширение наблюдательной сети. В настоящее время реализуется проект по запуску 13 новых пунктов наблюдений, укомплектованных современным оборудованием. Кроме того, на 5 существующих пунктах выполнена замена морально и физически устаревших приборов на новое оборудование.

Набор оборудования новых постов включает:

- газоанализаторы *HORIBA* серии *APxA-370* для измерения концентраций *NO*, *NO₂*, *NO_x*, *SO₂*, *CO*, *O₃*;
- приборы *Derenda APM-2* для измерения содержания твердых частиц фракций *PM₁₀* и *PM_{2.5}*;
- хроматографы *AMA GC5000* для определения концентраций бензола, толуола и ксилолов (орто-, мета-, пара-);
- комплект метеорологических датчиков, измеряющих температуру воздуха, атмосферное давление, относительную влажность, скорость и направление ветра, количество осадков и солнечную радиацию.

Однако программное обеспечение, поставляемое с новым оборудованием, оказалось непригодным для прямого использования в белорусской системе мониторинга. В данной статье выполнен анализ этих проблем и предложены методы их решения, основанные на разработке отечественного программного обеспечения.

Основная часть. При сборе данных о качестве атмосферного воздуха с использованием нового импортного оборудования возникает ряд проблем, которые можно классифицировать следующим образом:

- несоответствие периода усреднения национальным нормативам;

- различие в единицах измерения;
- закрытость форматов данных в составе павильонов;
- отсутствие в разрабатываемом ПО необходимых механизмов проверки данных;
- необходимость передачи данных в форматы, принимаемые системами РИСАМОС и АС Паветра.

Проблема 1: Несоответствие периода усреднения. Иностранное программное обеспечение, поставляемое с газоанализаторами *HORIBA*, реализует часовое усреднение данных, что соответствует международной практике. Однако белорусские нормативные документы требуют 20-минутного осреднения для оценки соответствия предельно допустимым концентрациям (ПДК). Попытка использовать часовые данные для оценки соответствия 20-минутным ПДК некорректна, поскольку за час концентрации могут существенно меняться, и кратковременные превышения норматива могут быть сглажены при усреднении. Для решения данной проблемы необходимо разработать программное обеспечение, реализующее сбор данных с высокой частотой и последующее формирование 20-минутных средних значений.

Проблема 2: Различие в единицах измерения. Иностранное ПО выдает результаты в частях на миллион (*ppm*) или частях на миллиард (*ppb*), тогда как белорусские нормативы оперируют микрограммами на кубический метр (мкг/м^3). Теоретически пересчет из объемных долей в массовые концентрации требует знания текущих температуры и давления воздуха. Однако на практике для обеспечения стабильности и независимости результатов используется упрощенный подход: применяются универсальные коэффициенты пересчета при нормальных условиях (температура 0°C , давление 760 мм рт. ст.), заложенные в приборы производителем.

Коэффициенты пересчета для различных веществ составляют:

- *NO* – 1,34 (пересчет из *ppb* в мкг/м^3 при 0°C и 760 мм рт. ст.);
- *NO₂* – 2,05;
- *SO₂* – 2,86;
- *CO* – 1,25;
- *O₃* – 2,14;
- бензол – 3,49;
- толуол – 4,11.

Такой подход обеспечивает воспроизводимость результатов, исключает зависимость от дополнительных метеодатчиков и их поверки, а также гарантирует получение данных даже при отказах второстепенного оборудования.

Проблема 3: Закрытость форматов данных в составе павильонов. Сами газоанализаторы *HORIBA* имеют открытые протоколы обмена (*UDP*) и позволяют получать данные в режиме реального времени. Однако в составе поставляемых павильонов устанавливается дата-логгер со встроенным программным обеспечением для сбора и обработки данных компании *Orion*. База данных этого логгера закрыта, и попытки прямого доступа к ней не увенчались успехом. Предусмотренное производителем *API* позволяет забирать данные, но только с часовым осреднением, что не удовлетворяет требованиям национальных нормативов.

Решение заключается в разработке собственных парсеров для непосредственного опроса приборов *HORIBA* (*UDP*), *Derenda APM-2* (*TCP*), метеодатчиков через модули *ADAM* (*Modbus*) и хроматографов (*MSSQL*) в обход закрытого дата-логгера.

Проблема 4: Необходимость валидации данных. В процессе эксплуатации выявлено, что по тем или иным причинам приборы могут выдавать некорректные значения. Например, при отключении метеодатчика или его неисправности может передаваться значение -40°C (начальное значение диапазона), которое не соответствует реальным условиям. Поскольку разработка собственного ПО ведется полностью самостоятельно, в него целесообразно заложить механизмы проверки поступающих данных.

Предлагаемая многоуровневая система валидации включает:

- проверку физически возможных значений (концентрации не могут быть отрицательными, скорость ветра ограничена);
- выявление резких скачков, нехарактерных для атмосферных процессов;
- анализ статусной информации приборов;
- проверку логических связей (например, соотношение $NO_x \approx NO + NO_2$);
- статистическую фильтрацию выбросов.

Проблема 5: Интеграция с национальными системами сбора данных. В Республике Беларусь функционируют две основные системы, аккумулирующие данные мониторинга окружающей среды: РИСАМОС (Республиканская информационная система автоматизированного мониторинга окружающей среды) и АС Паве́тра (автоматизированная система мониторинга атмосферного воздуха). Разрабатываемое программное обеспечение должно не только собирать и обрабатывать данные, но и передавать их в эти системы в форматах, которые они способны принимать.

Для этого необходимо реализовать модули экспорта данных, формирующие выходные файлы в соответствии с регламентами РИСАМОС и АС Паве́тра.

Предлагаемые методы решения. Для устранения выявленных проблем предлагается разработка отечественного программного обеспечения для сбора и анализа данных о качестве атмосферного воздуха на базе открытых технологий (*Python*, *PostgreSQL*). Основные компоненты такого решения включают:

- модули связи с приборами, реализующие асинхронный опрос газоанализаторов *HORIBA (UDP)*, приборов *Derenda APM-2 (TCP)*, метеодатчиков через модули *ADAM (Modbus)* и газохроматографов (*MSSQL*);
- модуль парсинга, преобразующий сырые данные от каждого типа приборов в унифицированный формат;
- модуль валидации, реализующий описанные проверки;
- модуль пересчета единиц измерения по фиксированным коэффициентам производителя;
- модуль агрегации для формирования 20-минутных, часовых, 8-часовых и суточных средних с контролем достаточности данных;
- модули экспорта данных в форматы, совместимые с РИСАМОС и АС Паве́тра.

Заключение. Выполнен анализ проблем сбора данных о качестве атмосферного воздуха, возникающих при модернизации сети наблюдений в рамках проектов международной технической помощи. Выявлены следующие недостатки штатного ПО: несоответствие периода усреднения белорусским нормативам, невозможность получения данных с требуемым осреднением из-за закрытости дата-логгеров, отсутствие в разрабатываемом ПО необходимых механизмов проверки данных и необходимость интеграции с национальными системами РИСАМОС и АС Паве́тра.

Предложены методы решения выявленных проблем, основанные на разработке отечественного программного обеспечения, осуществляющего прямой опрос приборов в обход закрытых компонентов. Разрабатываемая система обеспечивает сбор данных, их валидацию, пересчет по фиксированным коэффициентам производителя, формирование 20-минутных средних и экспорт в целевые системы.

Практическая реализация предложенных методов позволит успешно интегрировать 13 новых пунктов наблюдений и 5 комплектов замены в действующую систему мониторинга, обеспечив их соответствие национальным нормативам.

Список литературы

1. Всемирная организация здравоохранения. Загрязнение атмосферного воздуха [Электронный ресурс] : Информационный бюллетень. – 2022. – Режим доступа: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). – Дата доступа: 10.03.2026.
2. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Газоанализаторы APXA-370 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/395108>. – Дата доступа: 11.03.2026.
3. Comde-Derenda. Air Pollution Monitor APM-2 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.comde-derenda.com/en/products/apm-2/>. – Date of access: 11.03.2026.
4. AMA Instruments. GC5000 Series Gas Chromatographs [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ama-sensor.com/en/products/gc5000/>. – Date of access: 11.03.2026.
5. ADVANTECH. ADAM-4000 Series User Manual. – Taipei : Advantech Co., 2008. – 312 p.
6. ГОСТ 17.2.3.01-86. Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов. – Введ. 01.01.1987. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 12 с.
7. Постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 103 от 30.06.2020 «Об утверждении санитарных норм и правил «Требования к атмосферному воздуху населенных пунктов»». – Минск, 2020. – 25 с.

UDC 621.3.049.77–048.24:537.2

CONTROL OF MICROCONTROLLER UNDER THE INFLUENCE OF ELECTROSTATIC DISCHARGE

Novikov D.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Revinskaya I.I. – Senior Lecturer of the Department of EET

Annotation. The article examines the problems of air quality data collection that arise during the modernization of the observation network within the framework of international technical assistance projects. New equipment is supplied with software that does not meet the requirements of national regulatory documents regarding averaging periods and does not integrate with existing information systems. Methods for solving these problems are proposed, based on the development of domestic software adapted to local conditions, providing automatic data validation and their transmission to the RISAMOS and AS PAVETRA systems.

Keywords: air quality monitoring, international technical assistance, HORIBA gas analyzers, Derenda APM-2, data collection, RISAMOS, AS PAVETRA.

РАЗРАБОТКА ШПРИЦЕВОГО ВНУТРИВЕННОГО ИНФУЗИОННОГО НАСОСА

Сенкевич М.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Асиненко А.М. – ассистент кафедры ЭТТ

Аннотация. В статье рассмотрена разработка шприцевого внутривенного инфузионного насоса, предназначенного для дозированного введения лекарственных препаратов пациенту. Устройство реализовано на базе микроконтроллера и обеспечивает управление скоростью подачи раствора, контроль работы исполнительного механизма и индикацию режимов работы. Рассмотрены структура устройства, принцип функционирования и алгоритм работы системы управления. Предложенная модель позволяет повысить точность дозирования лекарственных средств и надежность работы медицинского оборудования.

Ключевые слова: инфузионный насос, микроконтроллер, медицинская техника, дозирование лекарственных средств, система управления

Введение. Современные медицинские технологии требуют высокой точности и надежности при введении лекарственных препаратов пациенту. Одним из наиболее распространенных устройств для дозированного введения растворов является шприцевой внутривенный инфузионный насос [2]. Данное устройство обеспечивает непрерывную и строго контролируруемую подачу лекарственного средства в организм пациента с заданной скоростью [3].

Целью данной работы является разработка и анализ принципа работы шприцевого внутривенного инфузионного насоса с микроконтроллерным управлением.

Основная часть. Шприцевой инфузионный насос представляет собой медицинское устройство, предназначенное для медленного и контролируемого введения лекарственных препаратов в организм пациента [2]. Основными элементами системы являются: микроконтроллер; исполнительный механизм (шаговый двигатель); система управления скоростью подачи; индикатор отображения параметров работы; элементы управления (кнопки); звуковая сигнализация.

Функциональная структура устройства представлена на рисунке 1:

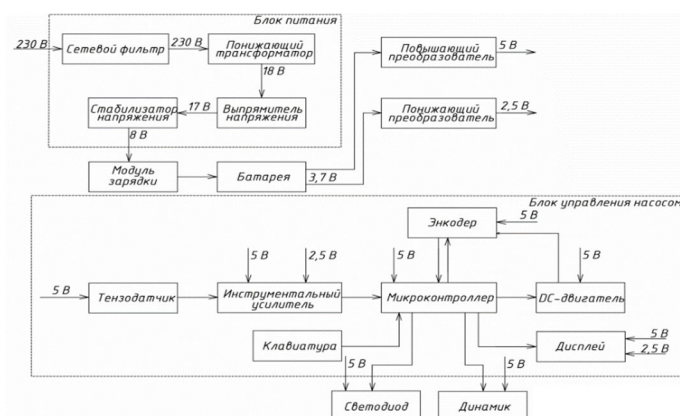


Рисунок 1 – Структурная схема шприцевого насоса

Микроконтроллер выполняет функции центрального управляющего элемента системы. Он осуществляет обработку сигналов с кнопок управления, формирует управляющие импульсы для шагового двигателя и контролирует режим работы устройства [4].

Исполнительный механизм приводит в движение поршень шприца, обеспечивая перемещение лекарственного раствора с заданной скоростью. Скорость движения определяется частотой управляющих импульсов, формируемых микроконтроллером [1].

Для управления скоростью инфузии используются кнопки выбора режима работы. В зависимости от выбранного режима микроконтроллер изменяет частоту вращения двигателя, что приводит к изменению скорости подачи раствора.

Алгоритм работы устройства можно представить следующим образом (рисунок 2).

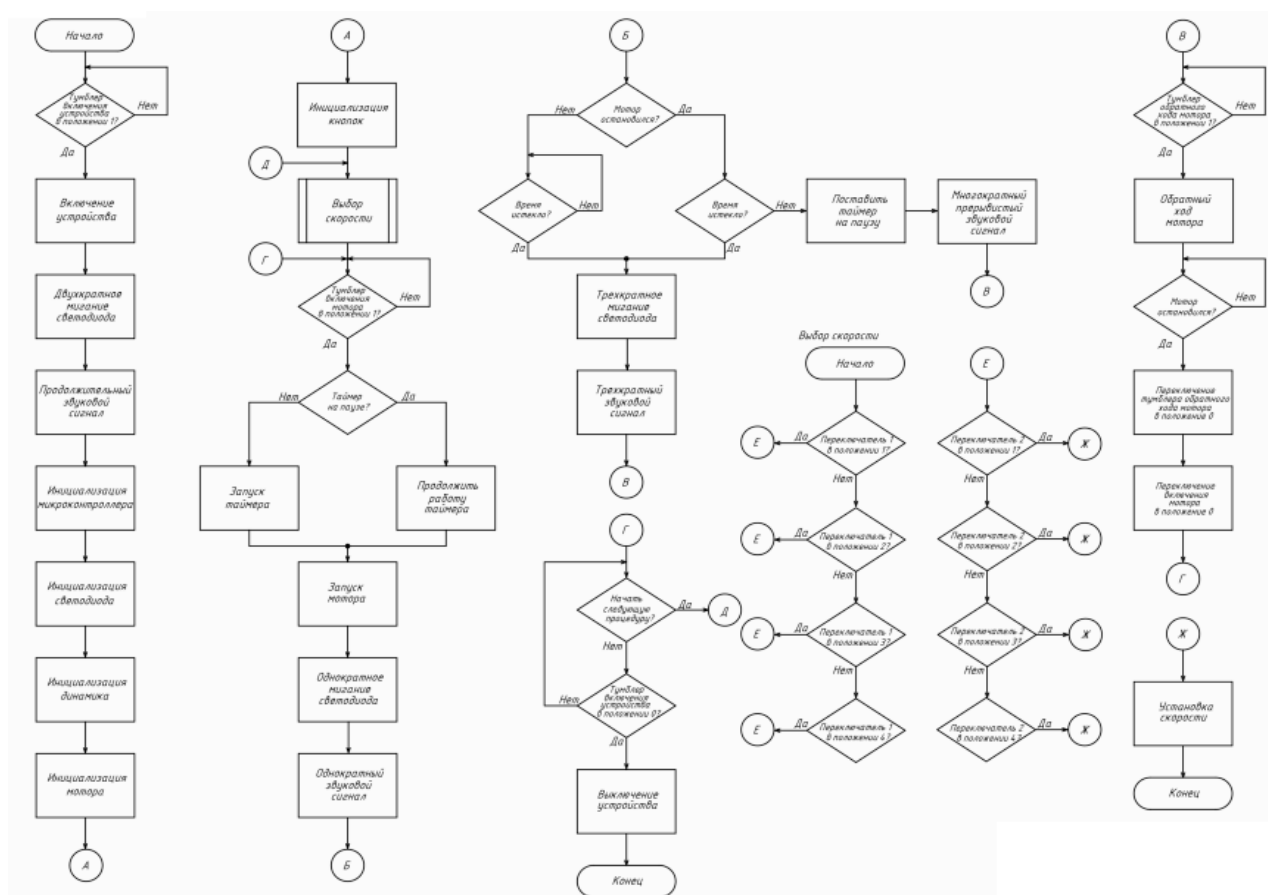


Рисунок 2 – Алгоритм работы инфузионного насоса

После включения устройства производится инициализация микроконтроллера и периферийных устройств. Далее пользователь выбирает необходимую скорость подачи лекарственного препарата. После подтверждения параметров микроконтроллер формирует последовательность управляющих сигналов для шагового двигателя, который начинает перемещение поршня шприца [3].

В процессе работы осуществляется постоянный контроль состояния системы. При возникновении ошибок (например, окончание раствора или блокировка механизма) формируется звуковой сигнал и работа устройства останавливается [4].

Использование микроконтроллерного управления позволяет реализовать дополнительные функции, такие как:

- программная регулировка скорости инфузии;
- контроль работы исполнительного механизма;
- индикация режимов работы устройства;

– звуковая сигнализация при возникновении аварийных ситуаций.

Заключение. В результате выполненной работы была разработана структурная модель шприцевого внутривенного инфузионного насоса на базе микроконтроллера. Предложенная система позволяет обеспечить точное дозирование лекарственных препаратов и автоматическое управление процессом инфузии.

Использование микроконтроллерной системы управления обеспечивает гибкость настройки параметров работы устройства, повышает надежность и безопасность эксплуатации медицинского оборудования. Разработанный подход может быть использован при создании современных медицинских инфузионных систем.

Список литературы

1. Webster, J. *Medical Instrumentation: Application and Design* / J. Webster. – New York : Wiley, 2014. – 720 p.
2. Bronzino, J. *Biomedical Engineering Handbook* / J. Bronzino. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 1024 p.
3. Geddes, L. *Medical Device Design* / L. Geddes, L. Baker. – New York : Wiley, 2016. – 640 p.
4. Алексеев, В.Ф. *Основы проектирования электронных медицинских устройств* / В.Ф. Алексеев. – Минск : БГУИР, 2017. – 256 с.

UDC 681.5.015:615.47

DEVELOPMENT OF A SYRINGE INTRAVENOUS INFUSION PUMP

Senkevich M.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Asinenko A.M. – Assistant Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology

Annotation. This article discusses the development of a syringe-based intravenous infusion pump designed for the measured administration of medications to patients. The device is based on a microcontroller and provides control of the solution flow rate, actuator operation, and operating mode indication. The device's structure, operating principle, and control system algorithm are discussed. The proposed model improves the accuracy of drug dosing and the reliability of medical equipment.

Keywords: infusion pump, microcontroller, medical equipment, drug dosing, control system

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРЕДСТЕРИЛИЗАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ

Важник М.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Асиненко А.М. – ассистент кафедры ЭТТ

Аннотация. В статье проведен анализ современных методов предстерилизационной очистки медицинского инструментария с акцентом на применение ультразвуковых технологий. Рассмотрены физические принципы акустической кавитации и ее влияние на эффективность удаления биологических загрязнений. Выполнен сравнительный анализ существующих на рынке технических решений, выявлены их основные достоинства и недостатки. Обоснована необходимость разработки отечественной микроконтроллерной ультразвуковой мойки, сочетающей высокую эффективность, безопасность и экономическую целесообразность.

Ключевые слова: ультразвуковая мойка, акустическая кавитация, предстерилизационная очистка, медицинская техника, микроконтроллерное управление, пьезоэлектрический излучатель.

Введение. Современные стандарты инфекционного контроля в медицинских учреждениях требуют безукоризненной подготовки хирургического, стоматологического и лабораторного инструментария перед его окончательной стерилизацией [1]. Ключевым этапом данной подготовки является предстерилизационная очистка (ПСО), цель которой заключается в полном удалении белковых, жировых и механических загрязнений, а также остатков лекарственных препаратов [2]. Традиционные методы ручной очистки с использованием щеток и моющих растворов характеризуются высокой трудоемкостью, риском травмирования персонала и недостаточной эффективностью при обработке инструментов сложной конфигурации (имеющих полости, замковые части, мелкую резьбу).

В связи с этим наиболее перспективным и технологичным методом признана автоматизированная ультразвуковая очистка [1]. Целью данной работы является анализ физических принципов работы ультразвуковых очистительных систем, обзор существующих на рынке решений и формирование требований к разработке перспективного устройства очистки с микроконтроллерным управлением.

Основная часть. В основе работы ультразвуковой мойки лежит явление акустической кавитации. Высокочастотные колебания, генерируемые пьезоэлектрическими излучателями, передаются в жидкую среду (моющий раствор), создавая в ней чередующиеся волны высокого и низкого давления. В фазе низкого давления в жидкости образуются микроскопические вакуумные пузырьки. В фазе высокого давления эти пузырьки стремительно схлопываются, порождая локальные гидродинамические удары огромной силы [3]. Именно эти микроскопические взрывы эффективно «отрывают» загрязнения от поверхности медицинского инструмента, проникая в самые труднодоступные микротрещины и полости.

Ключевым параметром, определяющим эффективность процесса, является рабочая частота ультразвукового генератора [3]. Низкие частоты (20-30 кГц) создают крупные кавитационные пузырьки с высокой энергией схлопывания, что оптимально для удаления грубых загрязнений с массивных инструментов. Более высокие частоты (35-45 кГц и выше) генерируют мелкие пузырьки, которые обеспечивают деликатную и бережную очистку хрупкого микрохирургического и стоматологического инструментария.

Анализ современного рынка медицинского оборудования показывает широкое разнообразие ультразвуковых ванн. Большинство коммерчески доступных устройств имеют схожую архитектурную концепцию, включающую резервуар из нержавеющей стали, блок пьезокерамических излучателей, высокочастотный генератор и блок управления [4].

Для оценки технических характеристик существующих устройств был проведен сравнительный анализ типовых представителей данного класса оборудования (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнительный анализ технических характеристик современных ультразвуковых моек

Характеристика	Бюджетный сегмент (Китай)	(Китай) Средний сегмент (СНГ/РФ)	Премиум сегмент (Европа)
Рабочая частота	40 кГц	35 кГц	37 кГц / 80 кГц
Управление	Аналоговое / простое цифровое	Цифровое	Микроконтроллерное
Наличие нагрева	До 80°C (без точного контроля)	До 60°C (термостат)	Точный контроль до 70°C
Режим дегазации	Отсутствует	В некоторых моделях	Присутствует
Режим качания частоты	Отсутствует	Отсутствует	Присутствует
Ориентировочная стоимость	Низкая	Средняя	Высокая

Как видно из проведенного анализа, бюджетные модели, обладая низкой стоимостью, не обеспечивают необходимого функционала для полноценной медицинской очистки [2]. В частности, в них часто отсутствуют режимы дегазации (удаления растворенного в воде кислорода, снижающего эффективность кавитации) и режима качания частоты (Sweep-режим, необходимый для равномерного распределения ультразвукового поля и исключения «мертвых зон» в объеме ванны). С другой стороны, европейские аналоги премиум-класса обладают избыточной стоимостью и высокой сложностью технического обслуживания. В связи с этим возникает научно-техническая задача разработки отечественной ультразвуковой мойки, которая объединила бы в себе доступность элементной базы и продвинутые алгоритмы микроконтроллерного управления (наличие режимов Дегазации, Качания частоты, точного ПИД-регулирования температуры моющего раствора для предотвращения коагуляции белковых загрязнений) [4].

Закключение. Проведенный анализ показывает, что ультразвуковая очистка является безальтернативным методом качественной предстерилизационной подготовки медицинских инструментов сложной формы. Обзор существующих технических решений выявил наличие рыночного пробела между дешевыми бытовыми ваннами с ограниченным функционалом и дорогостоящими медицинскими комплексами зарубежного производства.

Использование микроконтроллерной системы управления обеспечивает гибкость настройки параметров работы устройства, повышает надежность и безопасность эксплуатации медицинского оборудования. Разработанный подход может быть использован при создании современных медицинских инфузионных систем.

Список литературы

1. Webster, J. *Medical Instrumentation: Application and Design* / J. Webster. – New York : Wiley, 2014. – 720 p.
2. Bronzino, J. *Biomedical Engineering Handbook* / J. Bronzino. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 1024 p.
3. Хмелев, В.Н. *Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности* / В.Н. Хмелев. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с.
4. Алексеев, В.Ф. *Основы проектирования электронных медицинских устройств* / В.Ф. Алексеев. – Минск : БГУИР, 2017. – 256 с.

UDC 615.47:614.48

ANALYSIS OF MODERN METHODS AND TECHNICAL SOLUTIONS IN THE FIELD OF ULTRASONIC PRE-STERILIZATION CLEANING

Vazhnik M.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Asinenko A.M. – Assistant Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology

Annotation. The article analyzes modern methods of pre-sterilization cleaning of medical instruments with an emphasis on the use of ultrasonic technologies. The physical principles of acoustic cavitation and its influence on the efficiency of biological contaminants removal are considered. A comparative analysis of existing technical solutions on the market is carried out, their main advantages and disadvantages are identified. The necessity of developing a domestic microcontroller-based ultrasonic cleaner that combines high efficiency, safety, and economic feasibility is substantiated.

Keywords: ultrasonic cleaner, acoustic cavitation, pre-sterilization cleaning, medical equipment, microcontroller control, piezoelectric transducer.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛИТОГРАФИИ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Шульга А.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к.т.н., доцент, зав. кафедрой ЭТТ

Аннотация. Фотолитография – один из ключевых этапов производства микросхем. Когда размеры элементов становятся меньше, начинают сильнее сказываться оптические искажения, и без вычислительной литографии уже не обойтись. В статье разбирается, как методы машинного обучения помогают настраивать параметры литографического процесса.

Ключевые слова: фотолитография, вычислительная литография, машинное обучение, нейронные сети, микроэлектроника.

Введение. Одним из самых сложных этапов в микроэлектронике является фотолитография, то есть перенос рисунка с фотошаблона на пластину. При прохождении света через шаблон и оптику, возникают дифракция, интерференция и прочие волновые эффекты, из-за которых картинка искажается и элементы могут получиться с большими погрешностями. Чтобы это компенсировать, инженеры из EDA-компаний (Synopsys, Cadence, Mentor Graphics) и производители чипов (Intel, TSMC) разработали вычислительную литографию – набор алгоритмических методов, активно развиваемых в полупроводниковой индустрии, позволяющих заранее корректировать и модернизировать форму фотошаблона. Этот подход требует большие вычислительные мощности и затраты по времени. Машинное обучение (ML – machine learning) перерабатывает огромные объёмы данных и находит в них закономерности, делает прогнозы с высокой точностью. Сейчас есть много готовых библиотек Python для машинного обучения, используемые для анализа данных, классификации, регрессии и создания нейросетей, таких как: TensorFlow, Keras, Scikit-learn, CatBoost, XGBoost. Они активно используются в промышленности для прогнозирования параметров, анализа процессов или контроля качества.

Основная часть. Фотолитография является основным методом литографии в микроэлектронике. Это процесс нанесения на пластину фоторезистора, который затем засвечивают через шаблон, проявляют и травят [2]. Так как разрешение ограничено длиной волны при уменьшении деталей проявляется эффект оптической близости – искажения топологического рисунка при фотолитографии, вызванные дифракцией света и рассеянием электронов, что приводит к скруглению углов, уменьшению размеров линий и замыканию элементов. Оно требует коррекции шаблонов для точного переноса изображения на полупроводниковую пластину. Для исправления используют коррекцию оптической близости – шаблон делают немного искажённым, чтобы после прохождения через оптику получить нужное изображение [1].

Цель ML научить программу делать выводы на основе данных в различных задачах: классификация, регрессия, кластеризация, поиск аномалий и так далее. В производстве электроники активно применяется ML. Например, позволяет предсказывать, сколько проработает компонент, находить бракованные экземпляры или группировать похожие элементы. Для этого используют различные алгоритмы: от простой регрессии до нейросетей. Анализ изображений микросхем является одним из направлений, в котором с помощью свёрточных нейросетей можно автоматически сравнивать элементы одной партии и выявлять отклонения. Кластеризация помогает понять, какие детали действительно являются одинаковыми, какие – нет [4].

В литографии для облегчения и упрощения работы можно обучить нейросеть предсказывать результат экспонирования. Например, подача на входе разных вариантов шаблонов и анализ данных на выходе. Результаты показали, что использование нейронных сетей позволяет ускорить расчет фотошаблонов примерно в 100 раз при сохранении точности в 92% [5]. Это особенно важно, когда нужно быстро рассмотреть множество вариантов или встроить расчёты в автоматизированную систему проектирования.

Современные фабрики собирают большой объём информации о каждом этапе производства. Вручную это всё не проанализируешь, а алгоритмы эффективно анализируют. Они могут найти скрытые закономерности, которые помогут улучшить процесс или повысить качество. Также машинное обучение хорошо справляется с нелинейными зависимостями. В литографии много таких зависимостей, и аналитическими формулами её описать проблематично. В дальнейшем машинное обучение будет всё глубже встраиваться в систему автоматизированного проектирования и системы автоматического контроля. Например, компьютерное зрение уже сейчас демонстрирует высокую точность с поиском дефектов на пластинах, а с развитием методов будет работать ещё точнее.

Заключение. Данное направление перспективно развивается. Машинное обучение даёт возможность ускорить расчёты, повысить точность и корректно использовать данные с производства. Эти методы применяются для анализа качества компонентов, поиска дефектов и автоматизации контроля. Возможность быстрой аппроксимации сложных зависимостей делает эти методы перспективными для оптимизации литографических процессов в микроэлектронике.

Список литературы

1. *Computation lithography: virtual reality and virtual virtuality* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-17-15-12259>. Дата доступа: 06.03.2026.
2. *Литографические методы формирования структур* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://physics42.ru/tutorials/metamaterialy/litograficheskie-metody-formirovaniya-struktur/>. Дата доступа: 06.03.2026.
3. *Электронная вычислительная техника* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://computer-museum.ru/books/sbornik EVT 1987.pdf#page=19>. Дата доступа: 06.03.2026.
4. *Нанотехнологии в сфере микроэлектроники* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://elibrary.udsu.ru/xmlui/bitstream/handle/123456789/21665/161.pdf?sequence=1>. Дата доступа: 06.03.2026.
5. *Исследование эффективности применения различных архитектур нейросетей в расчете маски в задаче инверсной фотолитографии* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.t-niisi.ru/jour/article/view/24>. Дата доступа: 06.03.2026.

UDC 004.85:621.3.049.77

APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR OPTIMIZING LITHOGRAPHY PROCESSES IN MICROELECTRONICS

Shulga A.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Madveika S.I. – Cand. Of Sci., associate professor, head of the department of EET

Annotation. Photolithography is one of the key stages in microchip production. As elements become smaller, optical distortions begin to have a greater impact, and computational lithography becomes indispensable. This article examines how machine learning methods help to adjust the parameters of the lithography process.

Keywords: photolithography, computational lithography, machine learning, neural networks, microelectronics, process optimization

УДАЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА В ПЛАЗМЕ СВЧ С ПЛАСТИН БОЛЬШИХ ПЛОЩАДЕЙ

Масейкова Д.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к.т.н., доцент, зав. кафедры ЭТТ

Аннотация. Экспериментально и теоретически рассмотрен процесс удаления фоторезиста с поверхности полупроводниковых пластин больших площадей в условиях микроволновой плазмы. Показано, что равномерность очистки определяется распределением плотности плазмы, параметрами СВЧ-излучения и температурными условиями обработки. Предложены подходы к оптимизации параметров плазменного разряда и конструкции реактора, позволяющие повысить однородность удаления фоторезиста при обработке крупноформатных подложек.

Ключевые слова: фоторезист, СВЧ-плазма, плазменная обработка, полупроводниковые пластины.

Введение. Современное развитие микроэлектроники связано с ростом требований к миниатюризации и производительности интегральных схем. Этап удаления фоторезиста играет особую роль. Остатки фоторезиста могут снизить точность формирования топологии и надежность полупроводниковых устройств. При обработке пластин диаметром более 300 мм в СВЧ-плазменных установках возникает проблема неравномерного удаления фоторезиста. В результате появляются дефекты и увеличивается количество бракованных изделий.

В данной статье рассматриваются параметры плазменного разряда и предлагаются подходы к оптимизации процесса, что поможет улучшить равномерность удаления фоторезиста на подложках больших площадей.

Основная часть. Микроволновая плазма характеризуется высокой энергией электронов (1-10 эВ) при относительно низкой температуре тяжёлых частиц. Плотность заряженных частиц в таком разряде обычно составляет 10^{10} - 10^{12} см⁻³, что обеспечивает интенсивное взаимодействие с обрабатываемой поверхностью. Степень ионизации газа варьируется от 10^{-6} до 10^{-2} в зависимости от мощности СВЧ-излучения и давления в камере. Эти параметры определяют реакционную способность плазмы и её эффективность при удалении фоторезиста [1].

Генерация плазмы в СВЧ-поле происходит преимущественно за счёт безударного механизма поддержания разряда, где электроны эффективно нагреваются в переменном электрическом поле. Основным механизмом удаления фоторезиста в кислородсодержащей плазме является окислительный распад его органических компонентов. Атомарный кислород (О) и озонные радикалы (О₃), генерируемые в плазме, атакуют углерод-углеродные и углерод-водородные связи полимерной матрицы, что приводит к разрыву длинных цепей и образованию низкомолекулярных соединений, таких как СО, СО₂ и Н₂О. Летучие продукты реакции удаляются из зоны обработки потоком газа, обеспечивая постепенное истончение фоторезистного слоя. Параллельно с химическим окислением значительную роль играет физическое распыление продуктов деградации под действием ионной бомбардировки. Ускоренные в плазменном разряде ионы кислорода (О₂⁺) и аргона (Ar⁺) передают кинетическую энергию поверхности, разрушая ослабленные окислением участки [2].

Роль СВЧ-излучения в генерации плазмы. Однородность плазменного разряда при удалении фоторезиста напрямую определяется параметрами микроволнового излучения. Частота СВЧ-поля влияет на глубину скин-слоя и распределение энергии в плазме, что критично для обработки больших площадей. Мощность генератора определяет плотность электронов и радикалов, участвующих в химических реакциях удаления фоторезиста. Режим модуляции (импульсный или непрерывный) позволяет контролировать тепловую нагрузку на подложку, предотвращая локальные перегревы.

Геометрические параметры реактора оказывают существенное влияние на пространственное распределение плазменного поля. Конфигурация камеры обработки

определяет характер распространения электромагнитных волн и формирование стоячих волн. В реакторах цилиндрической формы наблюдается аксиально-симметричное распределение плотности плазмы, тогда как прямоугольные конструкции способствуют формированию неоднородностей в угловых зонах. Размеры рабочей области напрямую влияют на степень равномерности плазменного покрытия подложки.

Расположение СВЧ-излучателей относительно обрабатываемой подложки является критическим фактором равномерности генерации плазмы. Симметричная компоновка излучателей по периметру камеры способствует формированию однородного плазменного слоя. Система подачи реакционного газа с оптимизированной сеткой распределительных форсунок обеспечивает равномерное смешивание реагентов по всей площади пластины. Комбинированное воздействие этих факторов определяет стабильность параметров плазмы в приповерхностной зоне [3].

Материалы внутренних поверхностей реактора существенно влияют на локальную плотность активных частиц. Металлические стенки с высокой степенью отражения СВЧ-волн способствуют формированию стоячих волн и неравномерному распределению энергии. Диэлектрические покрытия уменьшают рекомбинацию заряженных частиц, но могут создавать зоны с повышенной концентрацией радикалов. Эти эффекты приводят к образованию пространственных неоднородностей в плазменном слое над обрабатываемой поверхностью.

Мощность СВЧ-излучения является ключевым параметром, определяющим плотность генерируемой плазмы. Повышение мощности приводит к увеличению концентрации активных частиц в плазменном объеме, что напрямую влияет на скорость удаления фоторезиста. Однако чрезмерное увеличение мощности может вызвать локальный перегрев подложки и деградацию её поверхностных свойств. Оптимальный диапазон мощностей обеспечивает баланс между высокой скоростью обработки и сохранением структурной целостности пластины.

Частота микроволнового излучения существенно влияет на глубину скин-слоя и пространственное распределение энергии в плазме. При стандартной частоте 2,45 ГГц наблюдается более выраженное поверхностное поглощение энергии, тогда как более высокие частоты обеспечивают лучшее проникновение в объем реактора. Это свойство позволяет управлять профилем плотности плазмы, что особенно важно для равномерной обработки пластин больших площадей. Выбор частоты должен учитывать геометрические параметры реактора и требуемую глубину взаимодействия.

Стабильность параметров СВЧ-генератора критически важна для поддержания однородной плотности плазмы на протяженных подложках. Колебания мощности или частоты приводят к пространственно-временным неоднородностям в плазменном разряде, что проявляется в виде зон с разной скоростью удаления фоторезиста. Особенно чувствительны к этим изменениям периферийные области пластин, где возможны эффекты краевого ослабления поля. Системы автоматической стабилизации параметров генератора минимизируют эти отклонения, обеспечивая технологическую воспроизводимость процесса [4].

Локальные перепады температуры на поверхности пластины создают значительные вариации в скорости удаления фоторезиста. Это связано с температурной зависимостью кинетики химических реакций между активными частицами плазмы и полимерным материалом. В зонах с повышенной температурой скорость реакций окисления возрастает экспоненциально, что приводит к ускоренному удалению фоторезиста [5].

Данный эффект особенно критичен на краях пластины, где наблюдаются максимальные градиенты из-за особенностей теплопередачи в системе.

Термические напряжения, возникающие из-за неравномерного нагрева подложки, способствуют образованию структурных дефектов. Разница коэффициентов теплового расширения между фоторезистом и материалом подложки усиливает механические напряжения в пограничных слоях. При превышении предела прочности это приводит к микротрещинам и расслоению материалов, что особенно проявляется при обработке пластин диаметром более 300 мм. Указанные дефекты снижают выход годных изделий и требуют дополнительных мер по контролю температурного поля.

Физические принципы плазменного травления лежат в основе обеспечения равномерности удаления фоторезиста на больших площадях. Ключевым аспектом является

достижение однородного распределения активных частиц плазмы по всей поверхности обрабатываемой пластины, что требует точного контроля параметров плазменного разряда, включая плотность электронов, температуру и состав реакционной среды. Особую роль играет синхронизация скорости химических реакций на границе раздела плазма-фоторезист с равномерностью подвода энергии СВЧ-излучения [6].

Модификация формы и взаимного расположения электродов позволяет достичь более равномерного распределения СВЧ-поля в рабочей камере, что обеспечивает гомогенность плазменного слоя по всей поверхности обрабатываемой подложки, данный аспект является критически важным для устранения пространственных вариаций скорости удаления фоторезиста. Внедрение асимметричных конфигураций электродной системы способствует компенсации краевых эффектов и повышению воспроизводимости процесса [7].

Заклучение. Анализ показывает, что равномерное удаление фоторезиста критически важно для полупроводниковой промышленности, особенно при обработке пластин диаметром более 300 мм. Увеличение спроса на высокопроизводительные интегральные схемы требует минимизации дефектов подложек и отходов, что связано с качеством плазменной очистки. Исследование выявило множество причин неравномерности обработки, включая геометрию реакторов и температурные градиенты. Оптимизация плазменных установок, включая распределение СВЧ-поля и многоуровневый температурный контроль, может повысить равномерность обработки. Разработанные рекомендации создают основу для масштабирования технологии плазменной очистки, что может снизить брак и себестоимость, соответствуя требованиям к миниатюризации и производительности электронных компонентов.

Список литературы

1. Бордусов С.В. Высокоскоростное удаление фоторезистивных пленок в послесвечении СВЧ разряда в кислороде // *Электронная обработка материалов*. – 2001. – №6. – С. 80–83.
2. Бордусов С.В. СВЧ-плазменные процессы в микроэлектронной технологии // *Электронная обработка материалов*. – 2001. – №3. – С. 72–78.
3. Достанко А.П., Русецкий А.М., Бордусов С.В. и др. *Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и нанoeлектроники*. – Минск: Бестпринт, 2011. – 210 с.
4. Симонов О. Использование микроволновой плазмы для удаления фоторезиста при групповой обработке полупроводниковых пластин // *Технологии*. – 2017. – №2. – С. 180–184.
5. Хамицевич Е.Ю., Лушакова М.С., Бордусов С.В. Вакуумно-плазменные системы двухчастотных разрядов для технологического применения // 54-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2018. – С. 194–195.
6. Яфаров Р.К., Климова С.А. Влияние свч плазменной микрообработки на электронные свойства поверхности кристаллов кремния (100) // *Журнал технической физики*. – 2014. – №3. – С. 103–107.
7. Bahena J.A., Tyler P., Taddei J. и др. An evaluation of bath life effects on photoresist removal for wafer level packaging // *IMAPS 2022 - 55th International symposium on microelectronics*. – Boston, MA, 2022. – С. 1–5.

UDC 621.3.095.3

MICROWAVE PLASMA PHOTORESIST REMOVAL FROM LARGE-AREA WAFERS

Maseikova D.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Madveiko S.I. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of EET

Annotation. The process of removing photoresist from the surface of large-area semiconductor wafers under microwave plasma conditions is examined experimentally and theoretically. It is shown that the uniformity of removal is determined by the plasma density distribution, microwave radiation parameters, and processing temperature conditions. Approaches to optimizing plasma discharge parameters and reactor design are proposed, allowing for improved photoresist removal uniformity during processing of large-format wafers.

Keywords: photoresist, microwave plasma, plasma processing, semiconductor wafers.

ОБЗОР МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Смольская Т.С., Друц Э.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Камлач П.В.. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. В статье представлен обзор современных методов сегментации медицинских изображений, применяемых при обработке данных компьютерной томографии. Рассмотрены классические алгоритмы сегментации, методы машинного обучения, а также современные нейросетевые архитектуры, используемые для выделения анатомических структур на медицинских изображениях. Проведен анализ преимуществ и ограничений различных подходов, а также рассмотрены перспективные направления применения методов глубокого обучения для автоматизации процесса сегментации и повышения точности построения трёхмерных моделей анатомических структур.

Ключевые слова: медицинские изображения, сегментация изображений, компьютерная томография, височная кость, среднее ухо, нейронные сети, глубокое обучение.

Введение. Современные методы медицинской визуализации играют ключевую роль в диагностике и лечении различных заболеваний. Одним из наиболее распространённых методов исследования костных структур является компьютерная томография (КТ).

Одной из важных задач обработки медицинских изображений является сегментация – процесс выделения отдельных анатомических структур на изображении [1]. Традиционно для решения задачи сегментации применялись классические методы обработки изображений, однако в последние годы значительное развитие получили методы машинного обучения и глубокого обучения, основанные на применении нейронных сетей. Особенно широкое распространение в медицинской визуализации получили сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN), позволяющие автоматически извлекать признаки изображений и выполнять сегментацию с высокой точностью. Архитектуры семейства U-Net и их модификации стали стандартом в задачах сегментации медицинских изображений. Также активно развиваются трехмерные модели и гибридные архитектуры, сочетающие сверточные сети и механизмы внимания.

Несмотря на значительные успехи в данной области, задача сегментации медицинских изображений, особенно содержащих мелкие анатомические структуры, остаётся актуальной и требует дальнейших исследований [2].

Целью данной работы является обзор современных методов сегментации медицинских изображений и анализ их применимости для обработки данных компьютерной томографии.

Основная часть. Медицинские изображения обладают рядом особенностей, которые существенно усложняют задачу их автоматической обработки. К таким особенностям относятся наличие шумов, низкий контраст между различными типами тканей, а также высокая вариабельность анатомических структур у разных пациентов. Кроме того, медицинские изображения часто содержат артефакты, возникающие в процессе сканирования.

Компьютерная томография широко применяется для исследования костных структур, включая височную кость и анатомические структуры среднего и внутреннего уха. КТ позволяет получать высокодетализированные послойные изображения, однако даже при высоком разрешении выделение мелких анатомических объектов может представлять значительные трудности.

Сегментация медицинских изображений представляет собой процесс разделения изображения на области, соответствующие различным анатомическим структурам. Результаты сегментации используются при построении трёхмерных моделей органов, планировании хирургических вмешательств, разработке медицинских имплантов и проведении количественного анализа анатомических структур.

Особую сложность представляет сегментация малых анатомических объектов, характерных для области среднего и внутреннего уха. Такие структуры имеют небольшие размеры, сложную форму и часто располагаются в непосредственной близости друг от друга, что требует применения высокоточных методов обработки изображений.

До широкого распространения методов машинного обучения сегментация медицинских изображений осуществлялась с использованием классических алгоритмов обработки изображений [3].

Одним из наиболее простых подходов является пороговая сегментация, при которой выделение объектов производится на основе значения интенсивности пикселей. Данный метод отличается простотой реализации, однако его применение ограничено в случаях, когда различные ткани имеют схожие значения интенсивности [4].

К другой группе методов относятся алгоритмы, основанные на выделении границ объектов. Эти методы используют различные операторы обнаружения границ, позволяющие определить контуры анатомических структур. Однако они чувствительны к шумам и не всегда обеспечивают точное выделение сложных форм.

Также применяются методы кластеризации, например алгоритм k-means, который позволяет группировать пиксели изображения по сходству их характеристик. Подобные методы могут использоваться для предварительного разделения изображения на области, однако требуют дополнительной обработки для получения точных границ структур.

Для сегментации медицинских изображений также используются методы активных контуров и уровневых множеств. Эти методы позволяют более точно учитывать форму объектов, однако их применение часто требует значительных вычислительных ресурсов и настройки параметров.

Несмотря на широкое распространение классических методов, их эффективность при обработке сложных медицинских изображений ограничена, что привело к активному развитию методов машинного обучения.

В последние годы для сегментации медицинских изображений активно применяются методы глубокого обучения. Наибольшее распространение получили сверточные нейронные сети, которые позволяют автоматически извлекать информативные признаки из изображений.

Одной из наиболее известных архитектур является U-Net, предложенная для задач биомедицинской сегментации [5]. Данная архитектура имеет симметричную структуру типа «кодировщик-декодировщик». Кодировщик выполняет извлечение признаков изображения, постепенно уменьшая его пространственное разрешение, а декодировщик восстанавливает изображение, формируя карту сегментации.

Важной особенностью архитектуры U-Net является использование так называемых skip-соединений, которые позволяют передавать информацию между соответствующими уровнями кодировщика и декодировщика. Это позволяет сохранять пространственные детали изображения и повышает точность сегментации.

С момента появления U-Net было предложено большое количество её модификаций, направленных на повышение точности сегментации и улучшение обработки сложных медицинских изображений [6].

Медицинские томографические данные, получаемые с помощью компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии, представляют собой трёхмерные объёмные изображения. В связи с этим всё большее распространение получают методы трёхмерной сегментации.

Одним из наиболее известных подходов является архитектура 3D U-Net, которая представляет собой расширение классической U-Net для работы с трёхмерными данными. В данной архитектуре используются трёхмерные свёртки, позволяющие учитывать пространственные связи между соседними срезами томографического изображения [7].

Использование трёхмерных моделей позволяет более точно учитывать форму анатомических структур и их пространственное расположение. Однако такие модели требуют значительно больших вычислительных ресурсов и объёмов обучающих данных.

В последние годы активно развиваются гибридные модели, объединяющие преимущества сверточных нейронных сетей и механизмов внимания. Одним из таких

направлений является использование трансформеров в задачах сегментации медицинских изображений.

Архитектуры на основе трансформеров позволяют более эффективно учитывать глобальные зависимости между различными областями изображения. Примером таких моделей являются UNETR и Swin-UNet, которые демонстрируют высокие результаты при сегментации сложных медицинских изображений.

Использование механизмов внимания позволяет модели автоматически определять наиболее важные области изображения и концентрировать на них вычислительные ресурсы, что повышает точность сегментации.

Анализ существующих методов сегментации показывает, что классические алгоритмы обработки изображений обладают рядом ограничений и часто не обеспечивают необходимой точности при обработке сложных медицинских данных.

Методы глубокого обучения, основанные на сверточных нейронных сетях, демонстрируют значительно более высокие результаты. Архитектуры семейства U-Net стали одним из наиболее распространённых инструментов сегментации медицинских изображений благодаря их эффективности и относительной простоте реализации.

Современные трёхмерные и гибридные модели позволяют учитывать пространственную структуру данных и обеспечивают более точное выделение анатомических объектов. В то же время такие модели требуют значительных вычислительных ресурсов и большого объёма обучающих данных.

В связи с этим выбор архитектуры нейронной сети для конкретной задачи сегментации должен учитывать особенности исходных данных, размеры анатомических структур и доступный объём обучающей выборки.

Итоговые результаты сравнительного анализа архитектур нейронных сетей для сегментации структур среднего и внутреннего уха по данным КТ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ архитектур нейронных сетей для сегментации структур среднего и внутреннего уха по данным КТ

Группы методов	Представители	Преимущества	Недостатки
Классические методы	– пороговые; – методы, основанные на выделении границ; – региональные методы; – кластеризационные методы; – графовые и вариационные методы	– простота реализации; – низкие вычислительные затраты; – интерпретируемость результатов	– чувствительность к шуму; – ручная настройка; – низкая устойчивость к вариативности анатомии; – сложность работы с 3D
Сверточные нейронные сети (CNN)	FCN	– автоматическое извлечение признаков; – высокая точность	– потеря мелких деталей при downsampling
Полносверточная нейронная сеть с модификацией	U-Net	– сохранение деталей (пропускные соединения); – хорошая работа при малых выборках данных; – простота реализации	– сегментация по отдельным срезам может приводить к разрывам структуры в 3D; – риск переобучения
Сверточные нейронные сети U-Net с модификациями	ResU-Net, Dense U-Net	– улучшенная передача градиента; – более глубокие модели; – устойчивость к переобучению	– повышенная сложность разработки

Продолжение таблицы 1

Группы методов	Представители	Преимущества	Недостатки
	Attention U-Net	– фокусировка на релевантных областях; – лучшее выделение малых структур	– требуются дополнительные параметры; – усложнение обучения
	3D U-Net	– учет пространственной структуры; – целостность анатомии	– высокие требования к оборудованию
Гибридные CNN-Transformer модели	TransUNet, UNet++	– учет глобального контекста и локальных признаков; – высокая точность	– сложность реализации; – необходимость больших данных

Заключение. В данной работе был проведён обзор современных методов сегментации медицинских изображений. Рассмотрены классические алгоритмы обработки изображений, а также современные подходы, основанные на применении методов машинного обучения и глубокого обучения.

Проведённый анализ показал, что традиционные методы сегментации обладают рядом ограничений и не всегда обеспечивают необходимую точность при обработке сложных медицинских данных. В последние годы наибольшую эффективность демонстрируют методы, основанные на использовании сверточных нейронных сетей, в частности архитектуры семейства U-Net и их модификации.

Результаты проведённого обзора могут быть использованы при выборе архитектуры нейронной сети для решения задачи сегментации структур среднего и внутреннего уха на данных компьютерной томографии, а также при разработке методов автоматизированного построения трёхмерных моделей анатомических объектов.

Список литературы

1. Litjens G., Kooi T., Bejnordi B. et al. A survey on deep learning in medical image analysis // *Medical Image Analysis*. – 2017. – Vol. 42. – P. 60–88.
2. Shen D., Wu G., Suk H. I. Deep learning in medical image analysis // *Annual Review of Biomedical Engineering*. – 2017. – Vol. 19. – P. 221–248.
3. Pham D. L., Xu C., Prince J. L. Current methods in medical image segmentation // *Annual Review of Biomedical Engineering*. – 2000. – Vol. 2. – P. 315–337.
4. Heimann T., Meinzer H. P. Statistical shape models for 3D medical image segmentation: a review // *Medical Image Analysis*. – 2009. – Vol. 13(4). – P. 543–563.
5. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*. – 2015. – P. 234–241.
6. Zhou Z., Siddiquee M. M. R., Tajbakhsh N., Liang J. UNet++: A Nested U-Net Architecture for Medical Image Segmentation // *Deep Learning in Medical Image Analysis*. – 2018. – P. 3–11.
7. Çiçek Ö., Abdulkadir A., Lienkamp S. S., Brox T., Ronneberger O. 3D U-Net: Learning Dense Volumetric Segmentation from Sparse Annotation // *MICCAI*. – 2016. – P. 424–432.

UDC 611.91

A REVIEW OF MEDICAL IMAGE SEGMENTATION METHODS

Smolskaya T.S., Druts E.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Kamlach P.V. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ETT

Annotation. This article presents an overview of modern medical image segmentation methods applied in the processing of computed tomography data. The paper examines classical segmentation algorithms, machine learning techniques, and modern neural network architectures used for delineating anatomical structures in medical images. An analysis of the advantages and limitations of various approaches is conducted, and promising directions for applying deep learning methods to automate the segmentation process and enhance the accuracy of constructing three-dimensional models of anatomical structures are discussed.

Keywords: medical images, image segmentation, computed tomography, temporal bone, middle ear, neural networks, deep learning.

ПСИХОДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕСТИРОВАНИЯ, ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОЦЕНКИ ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Гоман В.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Дик С.К. – к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедры ИКТ

Аннотация. В статье рассматривается разработка программного приложения для проведения психодиагностического тестирования в цифровой среде. В работе анализируются особенности компьютерной психодиагностики и возможности интеграции нескольких диагностических методик в единый программный комплекс. В приложении реализованы тест «Reading the Mind in the Eyes» (RMET), метод портретных выборов Сонди, восьмицветовой тест Люшера и тест цветовых отношений Фрилинга. Предложена модульная архитектура программного обеспечения, позволяющая обеспечить проведение тестирования, автоматическую обработку результатов и их сохранение.

Ключевые слова: психодиагностика, программное обеспечение, психологическое тестирование, RMET, тест Люшера, тест Сонди, Python

Введение. Современное развитие информационных технологий оказывает заметное влияние на многие области науки и практики, включая психологическую диагностику. Традиционные формы проведения тестирования постепенно уступают место компьютерным системам, которые позволяют ускорить обработку данных и повысить точность получаемых результатов. Использование программных средств позволяет автоматизировать расчёт показателей, снизить вероятность ошибок и обеспечить единые условия проведения тестирования для всех испытуемых.

Целью данной работы является разработка программного приложения для проведения психодиагностического тестирования, объединяющего несколько методик и обеспечивающего автоматическую обработку результатов.

Основная часть. Теоретические основы компьютерной психодиагностики. Компьютерная психодиагностика представляет собой направление, связанное с применением информационных технологий для проведения психологических тестов и анализа полученных данных. Одним из преимуществ таких систем является стандартизация процедуры тестирования. Автоматизация обработки результатов снижает вероятность ошибок и позволяет значительно ускорить процесс получения итоговых показателей.

Используемые психодиагностические методики. В разработанном приложении реализованы несколько психодиагностических методик, позволяющих оценить различные аспекты личности и эмоционального состояния. Тест Reading the Mind in the Eyes (RMET) направлен на оценку способности распознавать эмоциональные состояния по выражению глаз. Метод портретных выборов Сонди относится к проективным методам исследования личности. Восмицветовой тест Люшера используется для оценки эмоционального состояния на основе цветовых предпочтений. Тест Фрилинга применяется для анализа эмоционального отношения человека к различным сферам жизни.

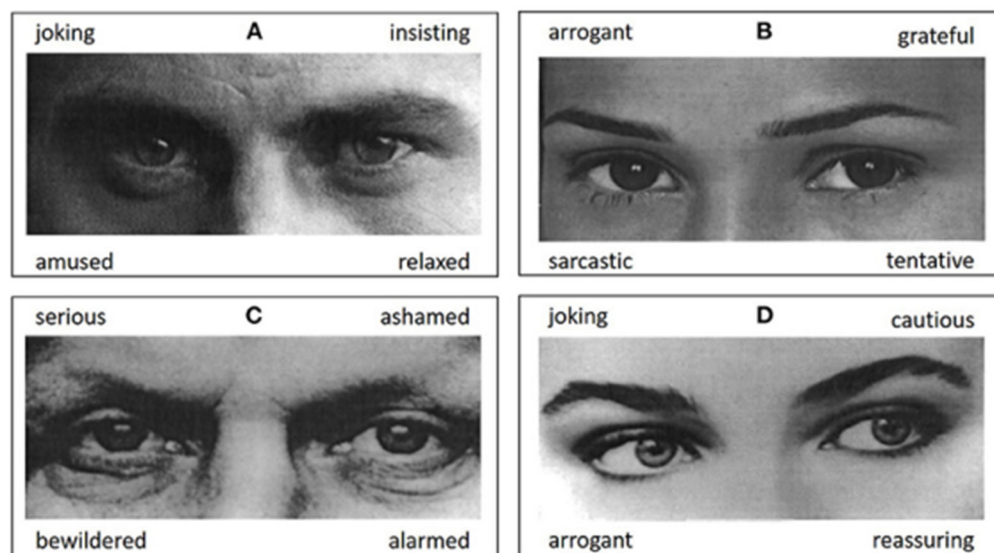


Рисунок 1 – Пример стимульного материала теста Reading the Mind in the Eyes (RMET)



Рисунок 2 – Пример стимульного материала метода портретных выборов Сонди

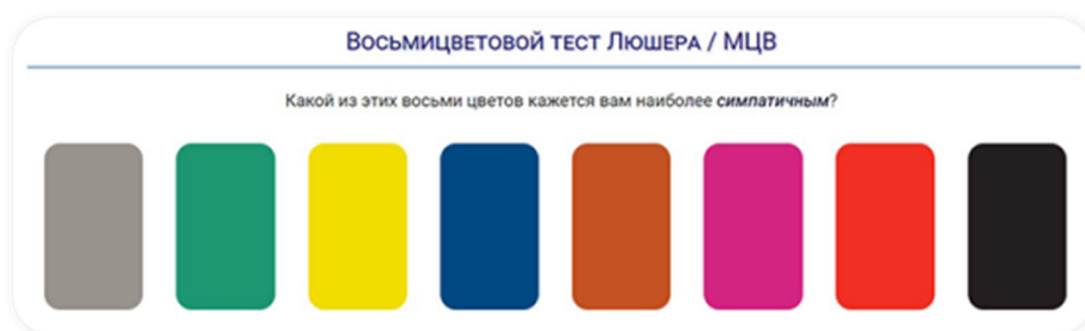


Рисунок 3 – Пример интерфейса восьмицветового теста Люшера

Архитектура и реализация приложения. Приложение разработано на языке Python с использованием библиотеки Tkinter для создания графического интерфейса пользователя.

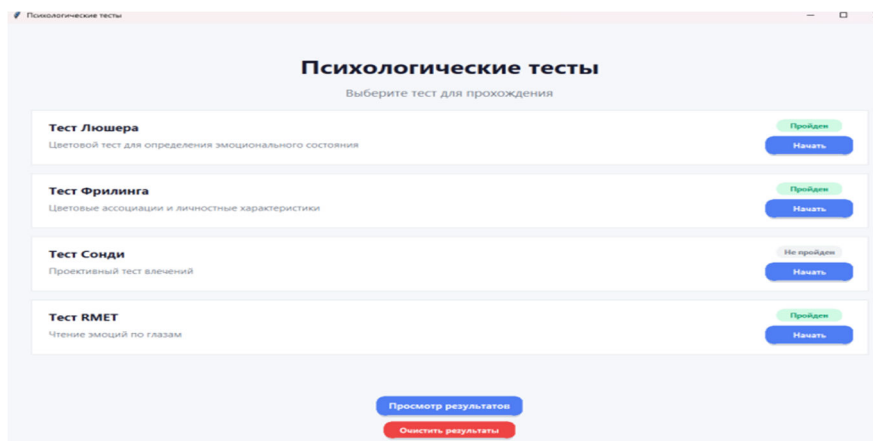


Рисунок 4 – Главное окно разработанного приложения для психодиагностического тестирования

Архитектура системы построена по модульному принципу. Каждый тест реализован как отдельный программный модуль. Для хранения результатов используется формат JSON, что обеспечивает простоту сохранения и последующей обработки данных.

Заключение. В результате выполнения работы разработано программное приложение для проведения психодиагностического тестирования. Программа объединяет несколько психологических методик и обеспечивает автоматическую обработку результатов. Модульная архитектура приложения позволяет расширять функциональность и добавлять новые тесты.

Список литературы

1. Трухан Е.А. Основы психодиагностики. – Минск : БГУ, 2014.
2. Вассерман Л.И. Компьютерная психодиагностика в теории и практике медицинской психологии. – СПб., 2021.
3. Baron-Cohen S. Another advanced test of theory of mind // *Journal of Child Psychology and Psychiatry*. – 1997.
4. Denzin N.K. *The Research Act: A Theoretical Introduction to Sociological Methods*. – New York, 1978.

UDC 004.9:159.9.072

PSYCHODIAGNOSTIC APPLICATION FOR AUTOMATING TESTING, PROCESSING RESULTS AND ASSESSING HUMAN PSYCHOLOGICAL STATE

Goman V.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Dik S.K. – Cand. of Sci.(Phys. and Math.), associate professor, Head of the Department of engineering and computer graphics

Annotation. The article discusses the development of a software application for psychodiagnostic testing in a digital environment. The paper analyzes the features of computer psychodiagnostics and the possibilities of integrating several diagnostic techniques into a single software package. The application implements the «Reading the Mind in the Eyes» test (RMET), the Szondi test, the eight-color Luscher test, and the Frieling color test. A modular software architecture is proposed, which allows for testing, automatic processing of results, and their storage.

Keywords: psychodiagnostics, software, psychological testing, RMET, Luscher test, Szondi test, Python.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ВНЕПОЛОСНОГО ПОДАВЛЕНИЯ КОМПАКТНЫХ ВХОДНЫХ ПОЛОСОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ И IoT-УСТРОЙСТВ

Марченко Т.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ЭТТ

Аннотация. Рассмотрены основные методы повышения внеполосного подавления компактных входных полосовых фильтров, применяемых в беспроводных приёмниках и устройствах Интернета вещей. Пояснено назначение внеполосного подавления и кратко описаны методы, основанные на применении открытых шлейфов и нагруженных резонаторов, смешанной электрической и магнитной связи, многопутевых многослойных структур и дефектной структуры земли. Выполнено сравнительное сопоставление указанных подходов по уровню избирательности, сложности реализации и применимости в малогабаритных устройствах.

Ключевые слова: входной полосовой фильтр, внеполосное подавление, нули передачи, беспроводный приёмник, IoT, компактный фильтр.

Введение. Входной полосовой фильтр является одним из основных узлов приёмного тракта беспроводного устройства. Он предназначен для выделения полезной полосы частот и ослабления сигналов, расположенных вне неё. Такое ослабление называют внеполосным подавлением. Его наличие необходимо для уменьшения влияния соседних каналов, паразитных излучений и мощных внеполосных помех на последующие каскады приёмника, в первую очередь на малошумящий усилитель, смеситель и цепи обработки сигнала [1].

Актуальность повышения внеполосного подавления особенно велика для беспроводных приёмников и устройств Интернета вещей, поскольку такие устройства работают в условиях плотного спектрального окружения, а также предъявляют жёсткие требования к габаритам, стоимости и технологичности печатной реализации [2]. В этих условиях повышение избирательности фильтра без существенного увеличения размеров и усложнения конструкции становится важной инженерной задачей.

В данной статье рассмотрены основные методы повышения внеполосного подавления компактных входных полосовых фильтров, кратко пояснены принципы их действия, а также выполнено сравнительное сопоставление указанных методов с точки зрения их практического применения в малогабаритных беспроводных устройствах.

Основная часть. Внеполосное подавление полосового фильтра определяется тем, насколько эффективно он ослабляет сигналы за пределами рабочей полосы частот. Повышение этого параметра обычно достигается за счёт увеличения крутизны скатов амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и формирования дополнительных нулей передачи вблизи полосы пропускания. Чем ближе такие нули передачи расположены к рабочей полосе и чем точнее согласованы параметры резонансной структуры, тем выше избирательность фильтра и тем лучше подавляются мешающие сигналы [3]. Для компактных входных фильтров, применяемых в беспроводных приёмниках и устройствах Интернета вещей (IoT), наибольший интерес представляют методы, позволяющие повысить внеполосное подавление без существенного увеличения площади печатной платы. К таким методам относятся применение открытых шлейфов и нагруженных резонаторов, использование смешанной электрической и магнитной связи, построение многопутевых многослойных структур, а также введение дефектной структуры земли.

Метод открытых шлейфов и нагруженных резонаторов основан на введении в структуру фильтра дополнительных резонансных участков, которые создают нули передачи вблизи полосы пропускания. В качестве таких элементов могут использоваться открытые шлейфы, радиальные шлейфы, а также резонаторы с дополнительной ёмкостной или индуктивной

нагрузкой. При правильном выборе их длины и места подключения удаётся заметно увеличить крутизну скатов амплитудно-частотной характеристики и улучшить подавление сигналов за пределами рабочей полосы. Достоинством данного метода является относительная простота расчёта и реализации на печатной плате. К его недостаткам относятся чувствительность к геометрическим размерам проводников, зазорам и параметрам подложки. [4]. Пример реализации фильтра с использованием этого метода представлен на рисунке 1.

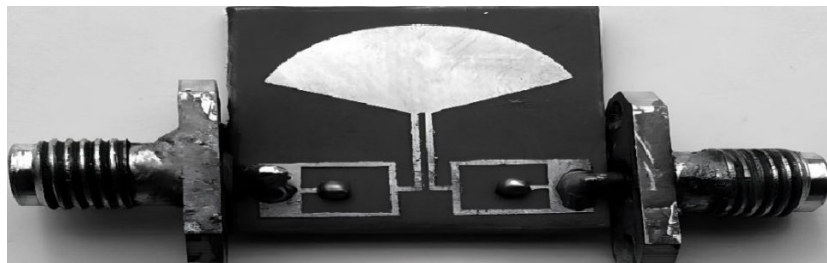


Рисунок 1 – Пример реализации метода открытых шлейфов и нагруженных резонаторов в полосовом фильтре [5]

Метод смешанной электрической и магнитной связи основан на управлении взаимодействием между соседними резонаторами. Если резонаторы расположены таким образом, что между ними одновременно возникают электрическая и магнитная составляющие связи, становится возможным целенаправленно изменять форму амплитудно-частотной характеристики и формировать дополнительные нули передачи. За счёт этого можно усилить подавление сигналов либо со стороны нижнего ската, либо со стороны верхнего ската полосы пропускания. Данный метод удобен тем, что позволяет повысить избирательность фильтра без существенного увеличения его размеров. Однако его реализация требует более точного выбора расстояний между резонаторами и более аккуратного моделирования, поскольку даже небольшие геометрические изменения заметно влияют на результат [6]. Пример реализации такого фильтра представлен на рисунке 2, электрическая связь в данном примере создаётся параллельными низкоомными участками резонаторов, а магнитическая связь – через металлизированное переходное отверстие между высокоомными частями резонаторов.

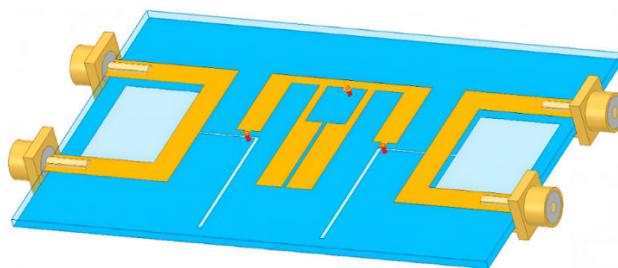


Рисунок 2 – Пример реализации метода смешанной электрической и магнитной связи в фильтре [7]

Метод многопутевых многослойных структур основан на создании нескольких путей прохождения сигнала с различными электрическими длинами и фазовыми задержками. При сложении сигналов, прошедших по этим путям, в отдельных участках частотного диапазона возникает взаимная компенсация, что приводит к образованию нулей передачи и росту внеполосного подавления. Данный подход позволяет получить высокую избирательность и расширенную полосу заграждения, однако обычно требует использования двухслойной или многослойной печатной платы, точного расчёта межслойных переходов и более сложного электромагнитного моделирования [6].

Ещё один способ связан с использованием дефектной структуры земли, то есть локальных вырезов или прорезей в проводнике заземления под фильтром. Такие дефекты изменяют распределение токов возврата и эквивалентные параметры линии, за счёт чего можно получить дополнительные резонансные эффекты и усилить подавление вне рабочей полосы. На практике этот подход часто сочетают с замедляющими структурами и многопроводниковыми резонаторами. Его преимуществом является высокая эффективность,

а ограничением – повышенная чувствительность к точным размерам топологии и к свойствам диэлектрика [8]. На рисунке 3 изображена нижняя сторона платы фильтра, изготовленного с использованием метода дефектной структуры земли.



Рисунок 3 – Нижняя сторона платы фильтра, изготовленного с использованием метода дефектной структуры земли [8]

Для наглядного сравнения выявленные методы сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнение методов повышения внеполосного подавления компактных фильтров

Метод	Механизм улучшения подавления	Преимущества	Ограничения
Открытые шлейфы и нагруженные резонаторы	Формирование нулей передачи за счёт дополнительных резонансных ветвей и ответвлений	Простая печатная реализация, хорошая селективность, малая площадь	Требуется аккуратная настройка размеров и связей
Смешанная электрическая и магнитная связь	Смещение нулей передачи к нижней или верхней стороне полосы пропускания	Гибкая настройка формы АЧХ без существенного увеличения габаритов	Повышенная чувствительность к геометрии связи
Многопутевые многослойные структуры	Получение нескольких нулей передачи за счёт интерференции сигналов и межслойных связей	Высокое подавление, расширенная полоса заграждения	Более сложное моделирование и изготовление
Дефектная структура земли	Изменение токов возврата и эквивалентных параметров линии с образованием дополнительных резонансных эффектов	Высокая эффективность подавления вне полосы	Чувствительность к размерам топологии и параметрам подложки

Сравнение рассмотренных методов показывает, что каждый из них обладает своими преимуществами и ограничениями. Открытые шлейфы и нагруженные резонаторы являются наиболее простыми в расчёте и реализации, поэтому хорошо подходят для компактных входных фильтров малогабаритных беспроводных устройств. Смешанная электрическая и магнитная связь позволяет более гибко управлять формой амплитудно-частотной характеристики и положением нулей передачи, однако предъявляет более высокие требования к точности геометрии. Многопутевые многослойные структуры обеспечивают высокий уровень внеполосного подавления и широкую полосу заграждения, но связаны с усложнением конструкции и технологии изготовления. Дефектная структура земли также позволяет существенно повысить подавление вне рабочей полосы, однако чувствительна к параметрам подложки и точности топологии.

На основании проведённого сопоставления можно сделать вывод, что для компактных входных фильтров беспроводных и IoT-устройств наиболее рациональными являются методы, основанные на использовании открытых шлейфов, нагруженных резонаторов и смешанной электрической и магнитной связи. Эти подходы обеспечивают хороший компромисс между уровнем внеполосного подавления, занимаемой площадью и сложностью реализации. Многопутевые многослойные структуры и дефектная структура земли более целесообразны в тех случаях, когда приоритетом является достижение максимально высокой избирательности и допускается усложнение конструкции фильтра.

Заключение. Рассмотрены основные методы повышения внеполосного подавления компактных входных полосовых фильтров для беспроводных приёмников и IoT-устройств. Показано, что повышение селективности достигается за счёт формирования дополнительных нулей передачи, управления связью между резонаторами, применения многослойных структур и дефектов в проводнике земли. Для печатных устройств малого размера наиболее рациональны методы на основе открытых шлейфов, нагруженных резонаторов и смешанной связи, так как они обеспечивают хороший компромисс между уровнем подавления, занимаемой площадью и сложностью реализации.

Список литературы

1. Авгари. Ф.С.А. Микрополосковый эллиптический фильтр с реализацией на резонаторах одинаковой электрической длины / Ф.С.А. Авгари, А.Р. Кубалова, А.П. Максимов // Труды учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 5–15.
2. Фомин Д.Г. Моделирование полосно-пропускающих фильтров на основе многослойной технологии / Д.Г. Фомин [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 77–87.
3. Семерня Р.Е. Разработка топологии компактных квазиэллиптических полосовых микрополосковых фильтров / Р.Е. Семерня [и др.] // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2018. – Т. 21, № 6. – С. 41–53.
4. Yang L. Miniaturized Broadband High Out-of-Band Rejection Bandpass Filter Based on Spoof Surface Plasmon Polaritons with Defected Ground Structure / L. Yang [et al.] // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Art. 26722.
5. Singh, P. K. Design of Radial Microstrip Band Pass Filter with Wide Stop-Band Characteristics for GPS Application / P. K. Singh, A. K. Tiwary, N. Gupta // Progress In Electromagnetics Research C. – 2015. – Vol. 59. – P. 127–134.
6. Савишиников М.О. Миниатюрный полосно-пропускающий СВЧ-фильтр со сверхглубоким уровнем подавления в широкой полосе заграждения / М.О. Савишиников // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2019. – Т. 12, № 7. – С. 758–764.
7. Li, Q. Optimization and Design of Balanced BPF Based on Mixed Electric and Magnetic Couplings / Q. Li, J. Fang, W. Cao [et al.] // Electronics. – 2023. – Vol. 12, No. 9. – Art. 2125.
8. Бугров В.Н., Кудряшова О.Е., Козлов С.А. Оптимальное проектирование микрополосковых устройств: практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2022. – 34 с.

UDC 621.372.543.2

METHODS FOR IMPROVING OUT-OF-BAND SUPPRESSION OF COMPACT INPUT BANDPASS FILTERS FOR WIRELESS AND IoT DEVICES

Marchenko T.V.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus
Scientific supervisor: Madveyko S.I. – Cand. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Electronic Engineering and Technology*

Annotation. The paper considers methods for improving the out-of-band suppression of compact input bandpass filters used in wireless receivers and IoT devices. The role of out-of-band suppression is explained, and it is shown that its improvement is achieved by generating additional transmission zeros, controlling the coupling between resonators, using multilayer structures, and introducing defects in the ground conductor. The considered approaches are compared in terms of selectivity, manufacturability, and implementation complexity on a printed circuit board. It is shown that open stubs, loaded resonators, and controllable cross-coupling are the most practical solutions for compact devices.

Keywords: input bandpass filter, out-of-band suppression, transmission zeros, wireless receiver, IoT, compact filter.

ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА И ТОПОЛОГИИ ЗЕМЛИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛОСОВОГО LC-ФИЛЬТРА

Марченко Т.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой ЭТТ

Аннотация. Рассмотрено влияние паразитных параметров печатного монтажа и топологии земли на характеристики полосового LC-фильтра. Показано, что паразитная емкость контактных площадок и межсоединений вызывает смещение резонансной частоты и изменение полосы пропускания, а паразитная индуктивность межсоединений и цепи возвратного тока ухудшает согласование, увеличивает вносимые потери и усиливает паразитные связи. Приведены оценочные соотношения для определения смещения резонансной частоты с учетом монтажных паразитных параметров и сформулированы практические рекомендации по построению топологии фильтра на печатной плате.

Ключевые слова: полосовой фильтр, LC-фильтр, паразитные параметры, печатный монтаж, топология земли, резонансная частота, АЧХ.

Введение. Полосовые LC-фильтры применяются во входных и межкаскадных цепях радиотехнических устройств, где требуется выделение полезной полосы частот и ослабление внеполосных составляющих сигнала. При синтезе таких фильтров обычно используются идеализированные модели индуктивностей и емкостей, тогда как в реальной конструкции существенную роль играют паразитные параметры контактных площадок, печатных проводников, переходных отверстий и опорных слоев платы [1]. На частотах диапазона сотен мегагерц этими эффектами уже нельзя пренебрегать, поскольку они вызывают смещение центральной частоты, изменение ширины полосы пропускания, рост вносимых потерь и ухудшение коэффициента отражения [2]. В данной статье рассмотрено, каким образом паразитные параметры печатного монтажа и топология земли изменяют характеристики полосового LC-фильтра, приведены простые оценочные соотношения и рекомендации, позволяющие уменьшить расхождение между расчетной и экспериментальной амплитудно-частотной характеристикой.

Основная часть. Реальная индуктивность, в отличие от идеальной, обладает не только активным сопротивлением, но и собственной паразитной емкостью. Конденсаторы также имеют эквивалентное последовательное сопротивление и паразитную индуктивность выводов и контактных площадок. Кроме того, печатные межсоединения между элементами фильтра обладают дополнительной индуктивностью, а контактные площадки и близко расположенные проводники – дополнительной емкостью [3]. В сумме это приводит к тому, что частотная характеристика фильтра, рассчитанная по номиналам дискретных элементов, в реальной печатной реализации оказывается смещенной и часто имеет более высокие потери. Для инженерной оценки удобно использовать эквивалентную модель звена полосового LC-фильтра, в которой расчетные элементы дополняются индуктивностью межсоединений L_m , паразитной емкостью монтажа C_p и индуктивностью пути возвратного тока L_g . Такая модель показана на рисунке 1.

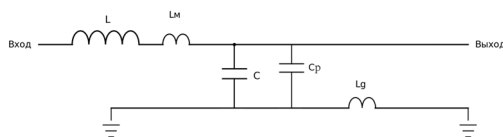


Рисунок 1 – Эквивалентная схема резонансного звена LC-фильтра с учетом монтажных паразитных параметров

При первом приближении влияние монтажных паразитных параметров на резонансное звено можно учесть путем введения эквивалентных значений Lm и Cp . Тогда резонансная частота звена определяется по формуле 1.

$$f'_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L + Lm)(C + Cp)}}, \quad (1)$$

где L – расчетная индуктивность катушки, Гн;

C – расчетная емкость конденсатора, Ф;

Lm – суммарная паразитная индуктивность печатных межсоединений и выводов, Гн;

Cp – суммарная паразитная емкость контактных площадок, соседних проводников и монтажных зазоров, Ф.

Если сравнивать реальную резонансную частоту f'_0 с идеальной частотой $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, то при малых относительных паразитных добавках можно получить линейную оценку смещения, представленную формулой 2.

$$\frac{\Delta f'_0}{f_0} \approx -\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{Lm}{L} + \frac{Cp}{C}\right), \quad (2)$$

где $\Delta f'_0 = f'_0 - f_0$ – смещение резонансной частоты, Гц.

Как следует из формулы 2, паразитная индуктивность и паразитная емкость действуют в одном направлении: обе уменьшают резонансную частоту. Это означает, что даже при корректном выборе номиналов элементов полоса пропускания реального фильтра смещается вниз по частоте, если топология платы не была учтена на этапе моделирования [4]. На рисунке 2 приведена расчетная зависимость относительного смещения резонансной частоты от отношения Cp/C при различных значениях относительной паразитной индуктивности Lm/L .

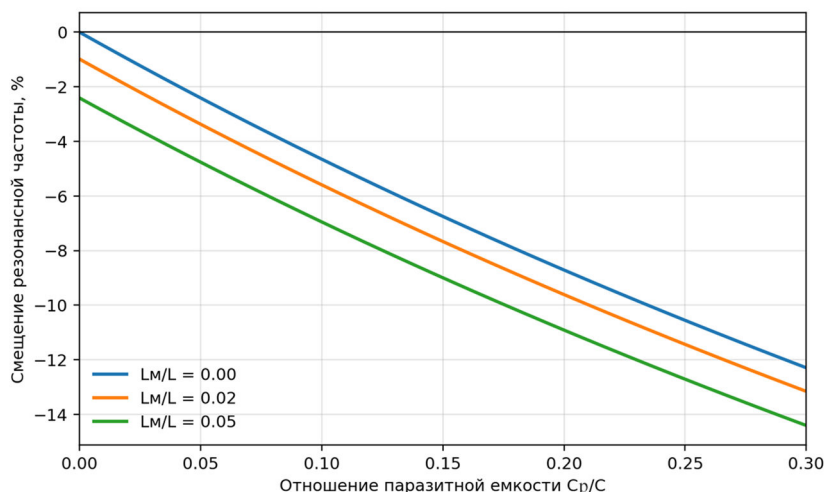


Рисунок 2 – Расчетное смещение резонансной частоты при увеличении паразитной емкости монтажа

Из рисунка 2 видно, что уже при отношении $Cp/C = 0,10$ расчетная частота может снижаться примерно на 5 % даже в случае пренебрежимо малой паразитной индуктивности монтажа. Если же дополнительно учитывать $Lm/L = 0,02...0,05$, то суммарное смещение возрастает примерно до 6...7,5 %. Для фильтров диапазона 200–300 МГц это означает отклонение центральной частоты на 12–20 МГц, что уже является практически значимым [4]. При росте Cp/C до 0,20 смещение становится еще более заметным, а фильтр может выйти за пределы допустимой полосы настройки. Следовательно, уменьшение размеров площадок, сокращение длины межсоединений и использование более компактной посадки элементов

оказывают непосредственное влияние на сохранение требуемой амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

Вторым важным фактором является топология земли. На частотах сотен мегагерц и выше опорный полигон уже нельзя рассматривать как идеальный нулевой потенциал, поскольку ток возврата протекает по конечному пути, обладающему собственной паразитной индуктивностью. Если земляной полигон разорван, переходные отверстия заземления удалены от фильтра или путь возвратного тока избыточно длинный, возрастает реактивное сопротивление цепи возврата, которое высчитывается по формуле 3.

$$X_g = 2\pi f L_g, \quad (3)$$

где X_g – реактивное сопротивление пути возвратного тока, Ом;

f – частота сигнала, Гц;

L_g – паразитная индуктивность пути заземления, Гн [2].

Это приводит к ухудшению согласования, росту вносимых потерь и усилению паразитной связи между соседними участками схемы.

При разорванной земле ток возврата вынужден огибать разрывы полигона и замыкаться по удлинённому пути. Это повышает эквивалентную индуктивность L_g , увеличивает напряжение на общем импедансе и создает условия для паразитных наводок. Напротив, сплошной полигон земли и близко расположенные переходные отверстия обеспечивают короткий путь возвратного тока и делают характеристики фильтра более устойчивыми [2]. В практических рекомендациях по ВЧ-разводке подчеркивается, что сигнальные дорожки и соответствующие им пути возврата должны быть максимально локализованы, а количество переходов между слоями следует минимизировать [5].

Для полосового LC-фильтра диапазона сотен мегагерц наибольшее влияние обычно оказывают четыре конструктивных фактора: длина межсоединений между элементами, размеры контактных площадок, удаленность элементов от сплошного полигона земли и число ближайших переходных отверстий заземления. Увеличение длины межсоединений повышает паразитную индуктивность, тогда как рост размеров площадок и близость широких проводящих поверхностей увеличивают паразитную емкость. Недостаточная непрерывность земли ухудшает путь возвратного тока, а дефицит переходных отверстий снижает эффективность связи верхнего сигнального слоя с опорным слоем [5].

Для наглядного сравнения основные проявления паразитных параметров и способы их уменьшения сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Влияние конструктивных факторов на характеристики полосового LC-фильтра

Конструктивный фактор	Физическое проявление	Влияние на характеристики фильтра	Рекомендуемое решение
Длинные межсоединения между L и C	Рост L_m и взаимной индукции	Смещение полосы вниз, ухудшение добротности, усиление паразитной связи	Минимизировать длину дорожек, располагать элементы компактно
Крупные контактные площадки	Рост C_p относительно расчетной емкости	Изменение центральной частоты и ширины полосы	Использовать минимально достаточные площадки
Разорванный полигон земли	Удлинение пути возвратного тока, рост L_g	Увеличение потерь, ухудшение согласования, нестабильная АЧХ	Сохранять сплошную землю под ВЧ-частью схемы
Редкие или удаленные via земли	Увеличение общего импеданса опорного слоя	Рост паразитных наводок и чувствительности к помехам	Располагать переходные отверстия земли как можно ближе к фильтру и чаще

Сопоставление, представленное в таблице 1, показывает, что на практике паразитные параметры печатного монтажа и топология земли действуют совместно. Например, при компактном размещении элементов можно уменьшить индуктивность межсоединений, но если под фильтром отсутствует сплошной полигон земли, выигрыш будет частично потерян из-за роста L_g . Поэтому наиболее рациональным является последовательный подход: сначала

выбираются реальные модели компонентов с учетом их собственных паразитных параметров, затем в схему вводятся эквивалентные паразитные параметры печатного монтажа, после чего уточняется топология земли и расположение переходных отверстий [6].

С инженерной точки зрения проектирование фильтра целесообразно вести в два этапа. На первом этапе используются схемотехнические модели дискретных компонентов, учитывающие добротность и собственную резонансную частоту. На втором этапе выполняется уточнение модели с учетом паразитных RLC-параметров печатной реализации. Подобный подход позволяет заранее оценить ожидаемое смещение полосы пропускания, заложить коррекцию номиналов и уменьшить число итераций после изготовления макета [6]. В условиях учебного и опытного проектирования это особенно важно, поскольку даже небольшая корректировка топологии нередко дает больший эффект, чем замена элементов на более дорогие аналоги.

Заключение. Таким образом, характеристики полосового LC-фильтра в реальной печатной реализации определяются не только расчетными номиналами элементов, но и паразитными параметрами монтажа и топологией земли. Паразитная емкость контактных площадок и межсоединений смещает резонансную частоту и изменяет форму полосы пропускания, а паразитная индуктивность межсоединений и цепи возвратного тока ухудшает согласование и повышает потери. Наиболее рациональным подходом при проектировании является совместный учет реальных моделей компонентов, монтажных паразитных параметров и организации опорного полигона земли. Применение коротких и симметричных межсоединений, минимально достаточных контактных площадок, сплошной земли под ВЧ-частью схемы и близко расположенных переходных отверстий позволяет существенно уменьшить расхождение между расчетной и экспериментальной АЧХ фильтра.

Список литературы

1. Gurov, E. V. *Analysis of the Parasitic Parameters Influence on the Analog Filters Frequency Response* / E. V. Gurov [et al.] // 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). – Prague, 2019. – P. 1–7.
2. Кечиев, Л. Н. Проблемы конструирования электронной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / Л. Н. Кечиев [и др.] // Технологии электромагнитной совместимости. – 2020. – № 1(72). – С. 18–30.
3. Ланин, В. Л. Электромонтажные соединения в электронике: технология, оборудование, контроль качества / В. Л. Ланин, В. А. Емельянов. – Минск : Интегралполиграф, 2013. – 406 с.
4. Журавлев, В. Я. Паразитные параметры печатного монтажа / В. Я. Журавлев, О. И. Подгайко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Вып. 3/7. – С. 49–52.
5. Конструирование и технология электронных систем : пособие к курсовому проектированию для студ. спец. «Электронно-оптические системы и технологии» всех форм обуч. / А. А. Костюкович [и др.]. – Минск : БГУИР, 2011. – 119 с.
6. Бабунько, С. А. Учет паразитных параметров SMD-элементов при проектировании полосовых фильтров / С. А. Бабунько, Ю. Г. Белов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/uchet-parazitnyh-parametrov-smd-elementov-pri-proektirovanii-polosovyh-filtrov>. – Дата доступа: 01.03.2026.

UDC 621.372.543.2

INFLUENCE OF PCB MOUNTING PARASITICS AND GROUND TOPOLOGY ON THE CHARACTERISTICS OF A BANDPASS LC FILTER

Marchenko T. V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Madveiko S.I. – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of EET

Annotation. The paper considers the influence of PCB mounting parasitics and ground topology on the characteristics of a bandpass LC filter in the VHF range. It is shown that parasitic capacitance of pads and interconnects causes a shift of the resonant frequency and changes the passband, while parasitic inductance of interconnects and the return-current path worsens matching and increases loss. Simple analytical relations and practical layout recommendations are presented.

Keywords: bandpass filter, LC filter, parasitic parameters, PCB layout, ground topology, resonant frequency, frequency response.

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ОБУЧАЮЩЕГО НАБОРА ДАННЫХ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ СТРУКТУР СРЕДНЕГО И ВНУТРЕННЕГО УХА НА КТ-ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Смольская Т.С., Друц Э.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Камлач П.В. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. В работе рассматривается методика формирования обучающего набора данных для разработки нейросетевой модели сегментации анатомических структур среднего и внутреннего уха по данным компьютерной томографии. Описаны особенности КТ-изображений височной кости, влияющие на процесс сегментации. Рассмотрены этапы подготовки исходных томографических данных, процедуры ручной разметки и формирования обучающей выборки для последующего обучения моделей глубокого обучения. Предложенный подход позволяет сформировать структурированный набор данных, пригодный для разработки и обучения нейросетевых алгоритмов сегментации медицинских изображений.

Ключевые слова: компьютерная томография, сегментация медицинских изображений, нейронные сети, медицинские данные, височная кость, среднее ухо, внутреннее ухо, обучающий набор данных.

Введение. Современные методы медицинской визуализации играют важную роль в диагностике заболеваний органов слуха. Одним из наиболее распространённых методов исследования костных структур является компьютерная томография (КТ), позволяющая получать высокодетализированные послойные изображения височной кости. КТ широко используется для анализа анатомии среднего и внутреннего уха, а также для планирования хирургических вмешательств.

В последние годы для обработки медицинских изображений активно применяются методы глубокого обучения, позволяющие автоматизировать процесс сегментации анатомических структур [1, 2]. Однако эффективность таких методов во многом зависит от качества и структуры обучающих данных. Для обучения нейросетевых моделей требуется формирование размеченных наборов медицинских изображений, что является сложной и трудоёмкой задачей.

Целью данной работы является разработка методики формирования обучающего набора данных для сегментации структур среднего и внутреннего уха на КТ-изображениях.

Основная часть. КТ-изображения височной кости характеризуются высокой плотностью костных структур и наличием мелких анатомических элементов. Структуры среднего и внутреннего уха, такие как улитка, преддверие, полукружные каналы и слуховые косточки, имеют малые размеры и сложную пространственную форму.

Дополнительные сложности связаны с наличием шумов и артефактов, а также низким контрастом между соседними тканями [4]. Кроме того, при сегментации медицинских изображений возникает проблема дисбаланса классов, когда объём целевых структур значительно меньше объёма фоновой области [5].

Указанные особенности требуют применения специальных методов подготовки данных перед обучением нейросетевых моделей.

Исходные данные компьютерной томографии представлены в формате DICOM, содержащем как изображения, так и метаданные о параметрах сканирования. Подготовка данных включает сбор КТ-исследований, проверку качества изображений и анализ параметров томографии.

Для повышения точности сегментации используются тонкосрезовые КТ-исследования с толщиной среза менее 1 мм. На этапе предобработки выполняется нормализация интенсивности изображений, приведение данных к единому формату и выделение области интереса.

Процесс формирования обучающего набора данных представлен на рисунке 1.

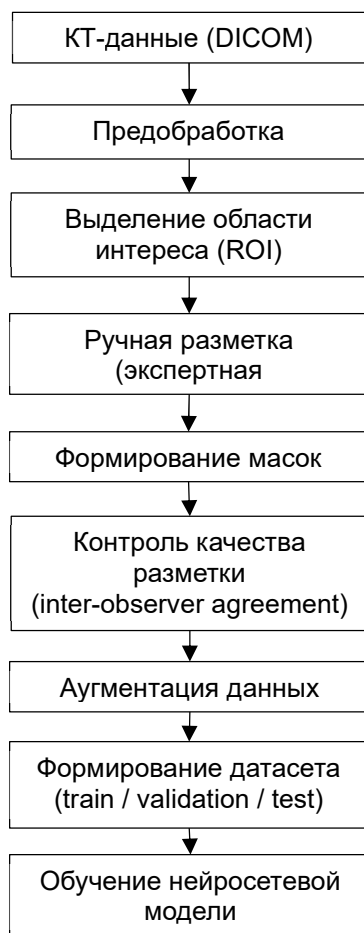


Рисунок 1 – Схема формирования обучающего набора данных для обучения нейросетевой модели сегментации

Формирование обучающего набора данных представляет собой многоэтапный процесс, включающий предобработку КТ-данных, разметку анатомических структур, формирование эталонных масок сегментации (ground truth) и подготовку данных для обучения нейросетевой модели. Важным этапом является контроль качества разметки, включая оценку согласованности между экспертами.

Разметка медицинских изображений является ключевым этапом формирования обучающего набора данных для задач сегментации [6]. Медицинская аннотация представляет собой процесс выделения и маркировки областей интереса на изображениях с целью формирования эталонных данных, необходимых для обучения моделей машинного обучения.

В рамках данного исследования разметка выполняется вручную с участием специалиста в области оториноларингологии. Для каждой анатомической структуры формируется отдельная маска сегментации, отражающая её пространственное расположение на КТ-изображениях.

На первом этапе выделяются основные анатомические структуры среднего и внутреннего уха, включая улитку, преддверие, полукружные каналы и слуховые косточки. Данный перечень может быть расширен в дальнейшем по мере развития исследования.

Процесс разметки включает последовательное выделение структур на послойных изображениях с последующей проверкой корректности границ. Особенностью медицинской аннотации является необходимость привлечения специалистов, обладающих знаниями анатомии и клинической практики, что существенно усложняет и удорожает процесс подготовки данных.

Следует отметить, что при ручной разметке возможно возникновение различий между экспертами (inter-observer variability), обусловленных субъективностью интерпретации границ анатомических структур [7]. Для повышения согласованности разметки используется повторная проверка результатов и согласование спорных участков.

Таким образом, корректная организация процесса аннотирования медицинских изображений является критически важным фактором при формировании качественного обучающего набора данных.

После выполнения разметки формируется обучающий набор данных для дальнейшего обучения нейросетевых моделей сегментации. Подготовленный набор данных включает исходные КТ-изображения и соответствующие маски сегментации.

Для обучения моделей глубокого обучения данные обычно разделяются на три части:

- обучающую выборку;
- валидационную выборку;
- тестовую выборку.

Такое разделение позволяет оценить качество работы модели и предотвратить переобучение [8].

Для оценки качества работы нейросетевых моделей сегментации используются количественные метрики, позволяющие сравнить результаты автоматической сегментации с эталонной разметкой.

Заключение. В работе предложена методика формирования обучающего набора данных для сегментации структур среднего и внутреннего уха на КТ-изображениях. Рассмотрены особенности медицинских изображений височной кости и основные этапы подготовки данных, включая сбор томографических исследований, разметку анатомических структур и формирование обучающей выборки.

Предложенный подход позволяет создать структурированный набор медицинских данных, пригодный для разработки и обучения нейросетевых моделей сегментации. В дальнейшем планируется использование сформированного набора данных для разработки алгоритмов автоматической сегментации структур среднего и внутреннего уха на основе методов глубокого обучения.

Список литературы

1. Litjens G., Kooi T., Bejnordi B. et al. A survey on deep learning in medical image analysis // *Medical Image Analysis*. – 2017. – Vol. 42. – P. 60-88.
2. Shen D., Wu G., Suk H. Deep learning in medical image analysis // *Annual Review of Biomedical Engineering*. – 2017. – Vol. 19. – P. 221-248.
3. Swartz J. D., Harnsberger H. R. *Imaging of the Temporal Bone* // Thieme Medical Publishers. – 2019.
4. Maier A., Syben C., Lasser T., Riess C. A gentle introduction to deep learning in medical image processing // *Zeitschrift für Medizinische Physik*. – 2019. – Vol. 29(2). – P. 86-101.
5. Pham D. L., Xu C., Prince J. L. Current methods in medical image segmentation // *Annual Review of Biomedical Engineering*. – 2000. – Vol. 2. – P. 315-337.
6. Isensee F., Jaeger P. F., Kohl S. A. A., Petersen J., Maier-Hein K. H. nnU-Net: a self-configuring method for deep learning-based biomedical image segmentation // *Nature Methods*. – 2021. – Vol. 18. – P. 203-211.
7. Karimi D., Salcudean S. E. Reducing the Hausdorff distance in medical image segmentation with convolutional neural networks // *IEEE Transactions on Medical Imaging*. – 2020. – Vol. 39(2). – P. 499-513.
8. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning* // MIT Press. – 2016.

UDC 611.91

METHOD FOR FORMING A TRAINING DATA SET FOR SEGMENTATION OF THE MIDDLE AND INTERNAL EAR STRUCTURES ON CT IMAGES

Druts E.V., Smolskaya T.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Kamlach P.V. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ETT

Annotation. The paper discusses the methodology for creating a training dataset for developing a neural network model for segmenting anatomical structures of the middle and inner ear based on computed tomography data. It describes the features of CT images of the temporal bone that affect the segmentation process. The paper also covers the steps of preparing the initial tomographic data, manual labeling procedures, and creating a training dataset for subsequent training of deep learning models. The proposed approach allows for the creation of a structured dataset suitable for developing and training neural network algorithms for medical image segmentation.

Keywords: computed tomography, medical image segmentation, neural networks, medical data, temporal bone, middle ear, inner ear, training dataset.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕЙСА NFC В ИМПЛАНТИРУЕМЫХ МЕДИЦИНСКИХ ДАТЧИКАХ

Сокольчик М. А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Урбанович С. П. – м.т.н., ведущий инженер Отраслевой Лаборатории «Приборы, системы и технологии медицинского назначения» БГУИР

Аннотация. Предлагается обоснование применения NFC интерфейса в подкожном имплантируемом датчике измерения глюкозы, его варианты аппаратной реализации.

Ключевые слова: Интерфейс NFC, имплантируемые датчики, региональная актуальность.

Введение. Существующие системы непрерывного мониторинга глюкозы в крови, такие как Abbott FreeStyle Libre, ICan и Senseonics Eversense, обладают следующими преимуществами: оперативность измерения уровня глюкозы, снижение HbA1c [1,2], адаптация периода измерения глюкозы к индивидуальным особенностям пациента, и, как следствие, снижение частоты госпитализаций по причине гипо-гипергликемии [3]. Однако описанные системы характеризуются высокой стоимостью. В Республике Беларуси не существует серийно выпускаемых устройств для вышеуказанных задач. Следовательно, актуализируется задача создания подобного имплантируемого датчика (ИД). Важной составляющей так же является минимизация себестоимости ИД при полном сохранении функциональности. В связи с этим в Отраслевой Лаборатории «Приборы, системы и технологии медицинского назначения» БГУИР разработан ИД непрерывного измерения глюкозы в крови, содержащий для связи с внешним устройством интерфейс NFC.

Способы обмена информации в ИД. Используются два основных способа: технология Bluetooth и интерфейс NFC. Bluetooth характеризуется рядом преимуществ: скорость и дальность передачи данных. Однако существуют недостатки: необходимо независимое питание для работы ИД и, как следствие, увеличенные габаритные размеры, не позволяющие создать миниатюрный, энергоэффективный ИД. NFC способен запитывать энергией ИД и при этом обеспечивает в большинстве случаев достаточную скорость обмена информацией. Также частота передачи данных NFC – 13.56 МГц не требует региональной сертификации, в то время как частота Bluetooth – требует.

Существует ряд требований к обмену информацией с имплантируемыми медицинскими датчиками: только беспроводная связь [4], электро-магнитная совместимость [5], биосовместимость [6]. Существуют и технические стандарты связи для бесконтактных карт ближнего действия (NFC Type A/B) — ISO/IEC 14443, ISO/IEC 15693, ISO/IEC 18092, которые описывают физическую и канальную модель связи.

Принцип работы NFC. Ниже приведена структурная схема интерфейса (рисунок 1). Согласно структурной схеме, обмен данных между носимым устройством и ИД происходит с помощью магнитной индукции, на частоте 13.56 МГц. Считыватель подносится на расстояние до 10 см в воздушной среде, для подкожной среды расстояние должно быть 2-3 см к имплантируемому датчику. Создаётся переменное магнитное поле на нужной частоте. В ИД находится радиометка (катушка индуктивности) [7], которая по принципу трансформатора передаёт энергию магнитного поля от катушки к контроллеру с помощью схемы Energy harvesting и Блока Питания. Тем самым микроконтроллер активируется. Далее ИД начинает работать по описанным разработчиком инструкциям (замеры контролируемых показателей, например). Затем, происходит обмен готовыми данными между ИД и носимым устройством. Блок-схема алгоритма обмена данными между носимым устройством и ИД приведена на рисунке

2. Считыватель регистрирует начало передачи информации, путём изменения добротности антенного контура. Изменяются фаза и частота переменного магнитного поля. Это происходит, так как ИД изменяет импеданс своей антенной цепи, изменение импеданса влияет на добротность контура и через взаимную индуктивность изменяется импеданс контура считывателя.

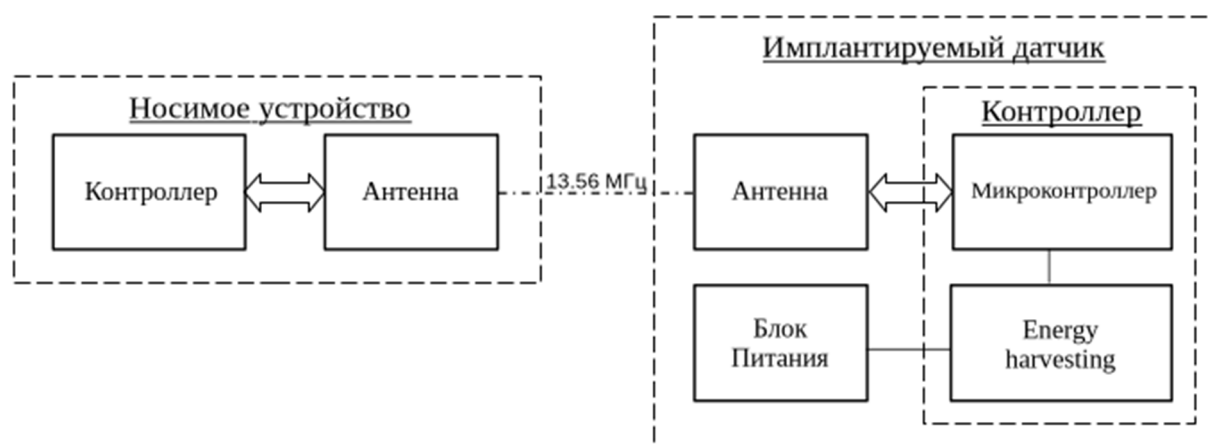


Рисунок 1 – Структурная схема NFC-интерфейса

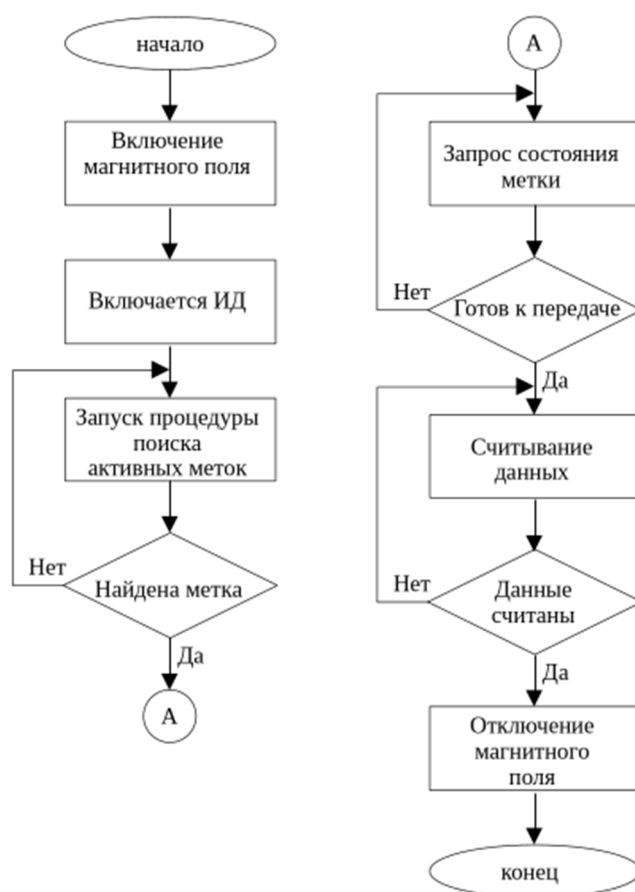


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма обмена данными

По схеме также стоит пояснить следующие моменты: блок «данные считаны» и блок «считывание данных». В ходе работ с технологией, исследователи пришли к выводу, что хорошим решением будут следующие операции: ввод на стадии проверки корректности считанных данных CRC/контрольной суммы; счётчик неудачных попыток; разделить передаваемую информацию на пакеты, с их последовательным подтверждением (ACK/NACK); будут полезны таймеры, защищающие систему от закливания и

непредсказуемого поведения. Вышеуказанный алгоритм обеспечивает стабильность соединения при проведении исследования.

Аппаратные решения. При разработке мы ориентировались на существующие аналоги и их технические решения. Существуют аппаратные решения и специализированные платформы, оптимизированные под конкретные клинические задачи. Такой подход обеспечивает максимальную интеграцию и энергоэффективность, однако требует значительных затрат на НИОКР и удлиняет цикл разработки. Нашей командой был выбран путь использования готовых коммерческих NFC-транспондеров. Так как подобные интерфейсы содержат необходимое аппаратное окружение; хорошо документированы; поддерживаются ПО для разработки и отладки; имеют определённый период эксплуатации, за который были выявлены и устранены их недостатки. На данный момент существует как отдельные микросхемы NFC-интерфейса, так и системы на кристалле, содержащие NFC-интерфейс с интегрированным процессором. Отдельные – ST25DV, NT3H2211, FM11NT0. Их ключевые преимущества – активный интерфейс ответа, блок памяти SRAM с неограниченным числом перезаписей (у аналогов с EEPROM 10^5 - 10^6), поддержка Energy harvesting для питания внешней схемы, компактный корпус. Однако в ходе работ над проектом нам понадобилось в ИД поместить микросхему отдельного NFC и микроконтроллер с другими датчиками. Мы посчитали разумным в таком случае использовать NHS3152. Данная система на кристалле имеет как интерфейс обмена данными, так и современный процессор с датчиками.

Закключение. Таким образом использование коммерческих интерфейсов NFC позволяет существенно снизить стоимость прототипирования, сокращает время выхода на рынок, снижает риски разработки, уменьшает габаритные размеры конечного устройства. Описанный принцип обмена информации дефакто стал стандартом для подкожных ИД, и рассмотренные аппаратные решения будут полезны при проектировании ИД других направленностей.

Список литературы

1. U.S. Food and Drug Administration. *Premarket Approval (PMA) P160030 [Электронный ресурс] : [официальный документ].* – Silver Spring : FDA, 2016. – Режим доступа: <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfpma/pma.cfm?id=P160030>. – Дата доступа: 15.03.2026.
2. Evans, M. *Reductions in HbA1c with Flash Glucose Monitoring Are Sustained for up to 24 Months: A Meta-Analysis of 75 Real-World Observational Studies* / M. Evans, Z. Welsh, A. Seibold // *Diabetes Therapy*. – 2022. – Vol. 13, № 6. – P. 1175–1185. – DOI: 10.1007/s13300-022-01253-9.
3. Eeg-Olofsson, K. *Real-world study of flash glucose monitoring among adults with type 2 diabetes within the Swedish National Diabetes Register* / K. Eeg-Olofsson, A.-M. Svensson, S. Franzén [и др.] // *Diabetes and Vascular Disease Research*. – 2023. – Vol. 20, № 1. – Art. 14791641211067418. – DOI: 10.1177/14791641211067418.
4. ГОСТ ISO 14708-1-2012. Имплантаты хирургические. Активные имплантируемые медицинские изделия. Часть 1. Общие требования к безопасности, маркировке и информации, предоставляемой изготовителем [Текст]. – Введ. 2014-01-01. – Минск : Госстандарт, 2013. – 45 с.
5. СТБ МЭК 60601-1-2-2024. Изделия медицинские электрические. Часть 1-2. Общие требования к безопасности, включая основные эксплуатационные характеристики. Дополнительный стандарт. Электромагнитная совместимость. Требования и испытания [Текст]. – Введ. 2024-07-01. – Минск : Госстандарт, 2024. – 156 с.
6. ГОСТ ISO 10993-1-2021. Биологическая оценка медицинских изделий. Часть 1. Оценка и исследования в рамках системы менеджмента рисков [Текст]. – Введ. 2022-07-01. – Минск : Госстандарт, 2021. – 68 с.
7. Microchip Technology Inc. *Antenna Circuit Design for RFID Applications [Электронный ресурс] : application note AN00710C* / Microchip Technology Inc. – Chandler : Microchip Technology Inc., 2015. – Режим доступа: <https://www1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00710c.pdf>. – Дата доступа: 15.03.2026.

UDC 621.396.6:615.47:616.379-008.64

USING NFC INTERFACE IN IMPLANTED SENSORS

Sakolchyk M.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Urbanovich S.P. – leading research engineer Branch “Laboratory Medical Instruments, Systems and Technologies”

Annotation. The article proposes a rationale for using the NFC interface in a subcutaneous implantable glucose sensor and its hardware implementation options.

Keywords: Near Field Communication (NFC), implantable sensors, regional relevance.

ИНЪЕКЦИОННЫЕ НЕЙРО–НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ СЕТИ: К МИНИМАЛЬНО ИНВАЗИВНЫМ МОЗГОВЫМ ИНТЕРФЕЙСАМ ДЛЯ ТОЧНОЙ НЕЙРОМОДУЛЯЦИИ

Ахмед Сохайб А. Ф.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Тумилович М.В. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры ЭТТ

Аннотация: В докладе рассматривается концепция инъекционных макропористых наноэлектронных сетей как альтернативы традиционным жестким нейроимплантатам. Проанализированы аппаратная архитектура, методы преодоления механического несоответствия с тканями мозга и механизмы беспроводной ультразвуковой телеметрии для передачи данных и энергии. Обоснована перспективность применения данных систем в терапии фармакорезистентной эпилепсии и болезни Паркинсона, а также выделены ключевые инженерные барьеры, включая проблему безопасной эксплантации.

Ключевые слова: медицинские электронные системы, нейромодуляция, наноэлектроника, инъекционные интерфейсы, биосовместимость, ультразвуковая телеметрия, нейроинженерия.

Введение. Развитие интерфейсов «мозг–компьютер» (BCI) и систем глубокой стимуляции мозга (DBS) исторически опиралось на использование жестких микроэлектродных массивов (например, Utah Array или массивы Мичиганского типа) [1]. Несмотря на их несомненную клиническую эффективность на начальных этапах применения, долгосрочная стабильность записи потенциалов действия критически снижается из-за неизбежной реакции на инородное тело [1, 4]. Разница в модуле Юнга между кремнием или вольфрамом (около 150 ГПа) и мягкой тканью мозга (1 – 10 кПа) вызывает хроническое микротрение при естественных физиологических пульсациях спинномозговой жидкости и дыхательных движениях. Это механическое несоответствие запускает каскад воспалительных реакций, активируя микроглию и астроциты, что в конечном итоге приводит к формированию плотного изолирующего глиального рубца вокруг электродов [3]. В связи с этим, фокус современных исследований радикально смещается в сторону инъекционной ультрагибкой наноэлектроники, способной физически и функционально интегрироваться с нейронными сетями на клеточном уровне без вызова выраженного иммунного ответа [4].

Основная часть. Физиологические барьеры и биосовместимость. Успешная трансляция наноэлектронных сетей в клиническую практику требует абсолютной минимизации травматизации при имплантации. Использование стереотаксической хирургии позволяет вводить свернутую полимерную макропористую сеть через микроканюлю или иглу с внутренним диаметром менее 100 мкм [3], что сопоставимо с размером самых мелких кровеносных сосудов, тем самым сохраняя целостность гематоэнцефалического барьера (ГЭБ).

Попадая в целевое ядро или кору, структура плавно разворачивается в водной среде ткани, адаптируясь к локальной трехмерной анатомии нейрональных ансамблей. Благодаря сверхвысокой пористости (более 80–90 %) и субклеточным размерам несущих элементов, сеть становится «невидимой» для иммунной системы и не воспринимается микроглией как сплошной барьер [3, 4]. Спустя несколько недель после инъекции наблюдается беспрепятственный рост аксонов, дендритов и капилляров сквозь ячейки устройства. Эта структурная синергия формирует стабильный и долговечный интерфейс, полностью исключая эффект механического и электрического экранирования сигнала, характерный для жестких зондов [3].

Аппаратная архитектура и проектирование биосенсоров. Основой конструкции выступают биосовместимые эластомеры и полимеры, такие как фоторезист SU-8 или полимонохлор–пара-ксилилен (Parylene-C) [3], общая толщина которых составляет всего несколько микрометров, что обеспечивает их изгибную жесткость, близкую к таковой у клеточных мембран. Проводящие пути формируются с использованием нанопроводов из

золота, платины или проводящего полимера PEDOT:PSS [4], который обладает уникальной способностью к смешанной электронно-ионной проводимости, снижая сопротивление на границе «электрод-ткань».

Ключевой фундаментальной проблемой миниатюризации является резкий рост комплексного импеданса электрода при уменьшении его площади, описываемый классическим уравнением 1:

$$Z = R_s + \frac{1}{j\omega C_{dl}}, \quad (1)$$

где Z – общий импеданс системы;

R_s – сопротивление растекания в электролите (ткани);

ω – угловая частота сигнала;

C_{dl} – ёмкость двойного электрического слоя на границе раздела фаз.

Для поддержания низкого значения модуля импеданса $|Z|$ (что критично для сохранения высокого отношения сигнал/шум при регистрации микровольтовых потенциалов действия), поверхности электродов покрываются нанопористым оксидом иридия (IrOx) или углеродными нанотрубками [4], многократно увеличивающими эффективную площадь взаимодействия без изменения геометрических размеров. Дополнительно в узлы сети напрямую интегрируются наноразмерные полевые транзисторы (Nano-FETs) для локального усиления слабого нейронного сигнала непосредственно в точке его возникновения [3, 4], а также схемы мультиплексирования с временным разделением каналов (TDM) для радикального сокращения количества исходящих физических микрокабелей.

Беспроводная передача энергии и данных. Отказ от чрескожных проводов является абсолютным и обязательным условием для долгосрочных мозговых имплантатов из-за риска восходящих инфекций и механических повреждений [1, 2]. Традиционная радиочастотная (RF) телеметрия оказывается неэффективной для инъекционных микросистем из-за сильного затухания высокочастотных электромагнитных волн в водосодержащих тканях и строгих ограничений по удельному коэффициенту поглощения (SAR) – нагрев мозговой ткани не должен превышать 1°C во избежание денатурации белков.

Учитывая, что скорость звука в биологических тканях составляет около 1500 м/с, длина волны ультразвука на безопасной частоте 1 МГц (около 1,5 мм) позволяет использовать микромасштабные приемники антенны [2]. В предложенной архитектуре энергия собирается посредством миниатюрных пьезоэлектрических нанокристаллов (например, титаната бария BaTiO_3 или цирконата-титаната свинца PZT), которые преобразуют внешние ультразвуковые акустические импульсы в электрическое напряжение для питания транзисторной логики [2]. Передача зарегистрированных нейронных данных наружу осуществляется методом акустического обратного рассеяния (ultrasonic backscatter) путем модуляции акустического импеданса кристалла в зависимости от локальной электрической активности нейронов. Это обеспечивает сверхэффективную пассивную передачу данных с практически нулевым собственным энергопотреблением имплантата [2].

Целевые клинические применения. Конформная интеграция полимерных сетей открывает совершенно новые терапевтические горизонты, недоступные для современных клинических устройств [4]:

1 Эпилепсия: высокоплотное пространственное картирование гиппокампа и неокортекса позволяет создать системы замкнутого цикла (closed-loop) для непрерывного мониторинга. Они способны алгоритмически детектировать паттерны зарождающейся икctalной активности и подавлять их точечными микроимпульсами за миллисекунды до клинического проявления приступа.

2 Болезнь Паркинсона и двигательные расстройства: инъекция сетей непосредственно в субталамическое ядро (STN) обеспечивает высоконаправленную (векторную) стимуляцию. В отличие от жестких электродов, сеть не смещается при движениях, сводя к минимуму активацию соседних путей и предотвращая побочные эффекты (такие как дизартрия или мышечные сокращения), характерные для классического DBS [1].

3 Нейропротезирование: восстановление моторных функций у пациентов с травмами спинного мозга посредством декодирования намерений движения из моторной коры с

высокой точностью [1, 3] для управления роботизированными экзоскелетами на протяжении десятков лет без потери качества сигнала.

Текущие ограничения и перспективы. Несмотря на высокий трансляционный потенциал, внедрение технологии сдерживается рядом барьеров. Фундаментальной проблемой остается эксплантация: после прорастания нервной ткани сквозь ячейки полимера [3], безопасное удаление устройства без повреждения паренхимы мозга становится практически невыполнимой хирургической задачей. Решение требует создания интеллектуальных биodeградируемых конструкций, способных к растворению по внешнему триггеру. Кроме того, оценка долгосрочной токсичности наноматериалов в спинномозговой жидкости диктует необходимость длительных испытаний *in vivo* [4]. Еще одним вызовом является «бутылочное горлышко» обработки данных: непрерывный поток информации от тысяч узлов требует разработки новых энергоэффективных алгоритмов машинного обучения для их декодирования в реальном времени.

Заключение. Инъекционная нейроэлектроника представляет собой качественный скачок в нейроинженерии. Синергия ультрагибких эластомеров, наносенсорики и ультразвуковой телеметрии позволяет элегантно преодолеть фундаментальные недостатки традиционных нейроимплантатов [1, 2, 4]. Успешный переход технологии в рутинную клиническую практику напрямую зависит от междисциплинарного решения проблем биоразлагаемости, кибербезопасности и обратимости хирургического вмешательства, что в перспективе сделает безопасный симбиоз человеческого мозга и вычислительных систем реальностью.

Список литературы

1. Normann, R. A. *Clinical applications of penetrating neural interfaces and Utah Array technologies* / R. A. Normann, E. Fernandez // *Journal of Neural Engineering*. – 2016. – Vol. 13, № 6. – Art. № 061003.
2. Seo, D. *Neural dust: an ultrasonic, low power solution for chronic brain-machine interfaces* / D. Seo [et al.] // *arXiv preprint arXiv:1307.2196*. – 2013. – 11 p.
3. Luan, L. *Ultraflexible nanoelectronic probes form reliable, glial scar-free neural integration* / L. Luan [et al.] // *Science Advances*. – 2017. – Vol. 3, № 2. – Art. № e1601966.
4. Hong, G. *Novel electrode technologies for neural recordings* / G. Hong, C. M. Lieber // *Nature Reviews Neuroscience*. – 2019. – Vol. 20, № 6. – P. 330–345.

UDC 615.47:621.38

INJECTABLE NEURAL NANO-ELECTRONIC MESHES: TOWARDS MINIMALLY INVASIVE BRAIN INTERFACES FOR PRECISE NEUROMODULATION

Ahmed Sohaib

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Tumilovich M.V. – Dr. of Sci., Professor, Professor of the department of ETIT

Annotation. This article explores the concept of injectable macroporous nanoelectronic meshes as a viable alternative to traditional rigid neuroimplants. The study analyzes the hardware architecture, methods for overcoming mechanical mismatch with brain tissue, and the mechanisms of wireless ultrasonic telemetry for power and data transmission. Furthermore, it substantiates the prospective clinical applications of these systems in the targeted therapy of drug-resistant epilepsy and Parkinson's disease, while also highlighting critical engineering barriers, primarily the challenge of safe explantation.

Keywords: medical electronic systems, neuromodulation, nanoelectronics, injectable interfaces, biocompatibility, ultrasonic telemetry, neuroengineering.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОНОМНЫХ НОСИМЫХ БИОСЕНСОРНЫХ СИСТЕМ С САМОПИТАНИЕМ ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ

Ахмед Сохайб А. Ф.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Тумилович М.В. - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры ЭТТ

Аннотация: В статье рассматривается переход от традиционных носимых IoT-устройств с литиевыми аккумуляторами к полностью автономным биосенсорным платформам. Представлена передовая архитектура, объединяющая гибридный энергоусъем на базе ферментных биотопливных элементов (BFC) и трибоэлектрических наногенераторов (TENG). Описана интеграция систем управления питанием с алгоритмами MPPT, гибких наноструктурированных суперконденсаторов и сверхмалопотребляющих пассивных каналов связи (NFC, RF Backscatter). Рассмотрены аспекты применения углеродных наноматериалов и технологий Edge AI. Предложенный подход формирует методологическую основу для создания необслуживаемых медицинских патч-систем непрерывного телемедицинского мониторинга.

Ключевые слова: биосенсоры, носимая электроника, биотопливные элементы, наногенераторы, TENG, суперконденсаторы, пассивная телеметрия, телемедицина, Edge AI.

Введение. Современные носимые биосенсорные платформы, находящиеся в авангарде персонализированной медицины, по-прежнему в значительной степени зависят от традиционных литиевых аккумуляторов. Это обстоятельство формирует их ключевое конструктивное ограничение и методологическую дилемму: при увеличении емкости источника неизбежно растут масса и габариты устройства, ограничивая мобильность пользователя и повышая дискомфорт, тогда как при уменьшении размеров резко сокращается срок автономной работы [1, 2]. Для имплантируемых решений, таких как кардиостимуляторы или нейростимуляторы, проблема приобретает еще более жесткий и критический характер, поскольку разряд источника питания нередко означает прямую необходимость повторного хирургического вмешательства, сопряженного с рисками для пациента.

На этом фоне концепция самопитающихся (self-powered) систем выглядит не просто привлекательной идеей, а единственно методологически обоснованной парадигмой развития. Устройство должно извлекать энергию из тех же физиологических или биомеханических процессов, которые оно регистрирует, переходя от режима периодического обслуживания к непрерывной эксплуатации. Этот сдвиг парадигмы требует пересмотра не только аппаратной части, но и всей методологии сбора и обработки медицинских данных [3].

Основная часть. Механизмы сбора энергии: сравнение классического и передового подходов

В контексте носимой электроники наиболее перспективными считаются два класса автономных источников: биоэнергетические элементы и трибоэлектрические наногенераторы (TENG). Каждый из них имеет свои преимущества и ограничения, и их синергетическое объединение является ключом к созданию надежных систем.

Традиционный IoT-подход: многие существующие разработки в области носимого Интернета вещей (IoT) по-прежнему используют устаревшие архитектурные решения. Как показано на блок-схеме стандартного IoT-устройства (рисунок 1), энергетическая цепь часто выглядит так: Пьезоэлектрические преобразователи (источник) → Схема умножения напряжения → Модуль зарядки аккумулятора → Аккумулятор (накопитель). Эта цепочка характеризуется множественными преобразованиями и потерями энергии. Например, пьезоэлектрики выдают высокое напряжение, которое необходимо умножить и затем преобразовать в низкий зарядный ток, что снижает общий КПД. Использование традиционного аккумулятора в качестве единственного буфера ограничивает гибкость и срок службы. Кроме того, этот подход часто полагается на энергоемкие WiFi модули для прямой

связи с веб-страницами, что быстро истощает энергию, полученную от харвестеров. Это базовая конфигурация с серьезными ограничениями.

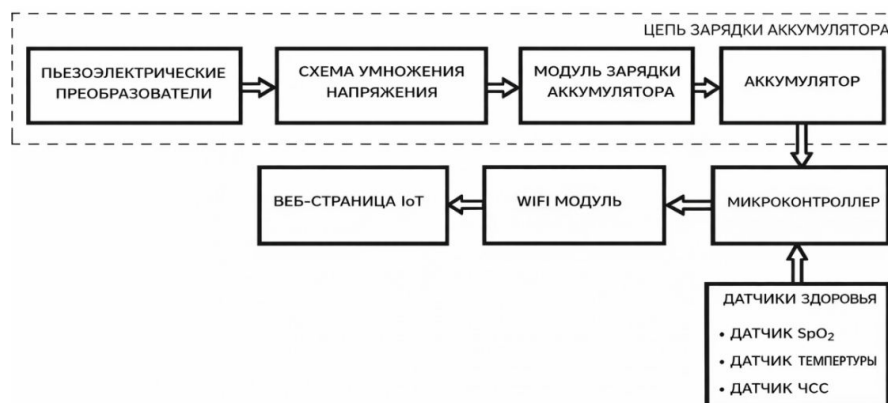


Рисунок 1 – Блок-схема традиционного носимого IoT-устройства

Передовой автономный подход: в отличие от классической модели, в статье обсуждается переход к более эффективной и гибкой архитектуре, представленной на блок-схеме автономного устройства (рисунок 2). Здесь биотопливные элементы (BFC) и TENG используются в качестве параллельных источников, оптимизируя сбор энергии. Наноструктурирование материалов, описанное ниже, является ключом к эффективности этих компонентов.



Рисунок 2 – Блок-схема усовершенствованной телемедицинской патч-системы с гибридным энергосбором

Для наглядного сопоставления ключевых технических и эксплуатационных параметров двух подходов в таблице 1 представлен сравнительный анализ рассматриваемых систем мониторинга.

Таблица 1 – Сравнительный анализ характеристик систем мониторинга

Параметр	Традиционный IoT (рисунок 1)	Автономная платформа (рисунок 2)
Источник питания	Литиевый аккумулятор	Гибрид BFC + TENG
Срок службы	Ограничен емкостью (1-2 дня)	Неограничен (Self-powered)
Вес и габариты	Высокие (из-за АКБ)	Сверхнизкие (гибкие пленки)
Протокол связи	Wi-Fi / Bluetooth (High Power)	NFC / Backscatter (Zero Power)
Экологичность	Проблемы утилизации лития	Биоразлагаемые наноматериалы
Обслуживание	Требует частой подзарядки	Не требует обслуживания

Ферментные биотопливные элементы (BFC) представляют собой элегантный вариант прямого преобразования химической энергии метаболитов организма в электрическую. Молекулы аналита, такого как глюкоза или лактат, выступают одновременно и в роли топлива, и в роли аналитического индикатора, что позволяет создавать «умные» биосенсоры с нулевым потреблением на сенсинг. Для эффективной работы BFC критически важно наноструктурирование электродов. Использование углеродных нанотрубок (CNT) и графена обеспечивает высокую удельную поверхность (рисунок 3), на которой иммобилизуется фермент.

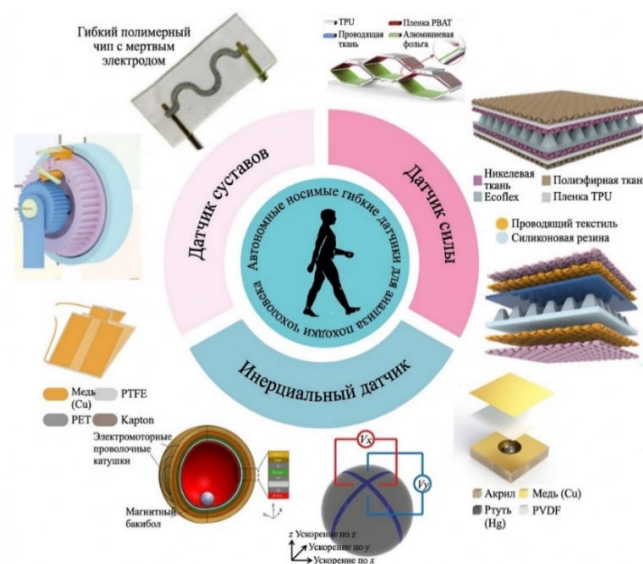


Рисунок 3 – Конструктивное исполнение и материальная база гибких носимых датчиков

Например, в лактат-кислородном элементе на аноде используется лактатоксидаза (см. рисунок 3), а на катоде – кислородвосстанавливающий катализатор (билирубиноксидаза) [3]. Чем больше площадь поверхности CNT/графенового анода, тем выше плотность тока, поскольку CNT/графен не только увеличивают площадь иммобилизации, но и облегчают прямой перенос электронов. Экспериментальные образцы носимых биоэлементов демонстрируют мощность от десятков до сотен микроватт [1, 3]. Продвинутое конструкции используют многослойные CNT/графен/CNT электроды для максимизации этого эффекта, достигая плотности мощности до 1 мВт/см².

Трибоэлектрические наногенераторы (TENG) работают за счет использования механического движения тела. При периодическом контакте и разделении двух материалов с различной электроотрицательностью возникает эффект контактной электризации, формирующий импульсный высоковольтный сигнал [4]. Характерная электрофизическая особенность TENG заключается в сочетании высокого напряжения и малого тока. Из-за этого генератор целесообразно использовать не для прямого питания, а как компонент для медленного накопления заряда в высокоэффективном буфере (см. рисунок 2). Наноструктурирование поверхности также критично для TENG. Создание наноразмерных массивов на поверхности PTFE/Al пленок значительно увеличивает эффективную площадь контакта, а CNT/графеновые электроды обеспечивают низкое внутреннее сопротивление (см. рисунок 3).

Комбинирование этих принципов в гибридные схемы значительно повышает отказоустойчивость. BFC и TENG работают синергетически. BFC обеспечивает базовый, стабильный ток (например, от метаболитов в поту), а TENG компенсирует дефицит энергии при активном движении (см. рисунок 2). Этот гибридный подход позволяет покрывать фазы физической активности и периоды покоя: при снижении потоотделения дефицит компенсируется механическим каналом, а при минимальных движениях химический канал обеспечивает базовое питание микроконтроллера [1].

Архитектура управления питанием и энергетический баланс. Критически важным звеном в автономной системе является система управления питанием (Power Management System), представленная на блок-схеме (см. рисунок 2). Носимая электроника требует

сверхнизковольтных преобразователей, способных стартовать при входных напряжениях порядка сотен или даже десятков милливольт. На практике используются многоступенчатые схемы с цепями «холодного старта».

В отличие от традиционного подхода, продвинутая система включает в себя:

Систему MPPT (отслеживание точки максимальной мощности): поскольку выходные параметры BFC и TENG динамически меняются, алгоритмы MPPT подстраивают эквивалентную нагрузку преобразователя под текущие параметры генератора в режиме реального времени. Это гарантирует извлечение максимальной доступной мощности [5].

Гибкий суперконденсатор (энергобуфер): это ключевое отличие. Использование гибкого суперконденсатора вместо аккумулятора решает проблему медленной зарядки и ограниченного срока службы. Суперконденсатор способен аккумулировать заряд при неравномерном поступлении энергии и отдавать его мощными импульсами при пиковой нагрузке [6]. Использование высокоплотных CNT/графеновых электродов в суперконденсаторе (см. рисунок 3) обеспечивает высокую емкость.

Для энергетического баланса показано, что питание от суперконденсатора подается на микроконтроллер, который управляет датчиками и осуществляет обмен данными. Критически важно, чтобы совокупное энергопотребление системы не превышало мощность BFC и TENG.

Интеграция системы: вычислительные задачи и пассивная телеметрия. Современные микроконтроллерные системы на кристалле способны функционировать в микроваттном диапазоне. Сенсорный модуль с NFC-меткой может получать энергию от поля внешнего считывателя (на частоте 13,56 МГц) и работать без собственной батареи [7]. Альтернативным каналом является радиочастотный backscatter (обратное рассеяние). В этом режиме устройство не генерирует собственную радиопередачу, а изменяет импеданс антенны, модулируя отраженный внешний несущий сигнал [8]. Основная часть энергетических затрат перекладывается на внешний источник.

Материалы и технологии изготовления: от теории к практике. Для реализации самопитающихся систем критически важна материальная база, способная сочетать высокую электропроводность, гибкость и биосовместимость. Углеродные наноматериалы (нанотрубки, графен, MXene-пленки) и проводящие полимеры (PEDOT:PSS) играют центральную роль. Они служат основой для наноструктурированных электродов с высокой удельной поверхностью (см. рисунок 3).

В автономной носимой электронике востребованы углеродно-эластомерные композиты и MXene-пленки. Двумерные карбиды и нитриды переходных металлов (MXene) обеспечивают высокую электропроводность и возможность химической модификации поверхности [9]. Углеродно-эластомерные композиты успешно применяются в гибких электродах для BFC и контактных слоях TENG (см. рисунок 3).

С точки зрения производства преобладают методы печатной электроники (трафаретная печать), позволяющие наносить функциональные чернила на эластичные подложки из полиуретана (TPU) или силикона, формируя устройства, устойчивые к деформациям [9].

Edge AI и проблемы физиологической реализуемости. Несмотря на прогресс, практическая реализация сопряжена с фундаментальными проблемами, такими как нестабильность мощности и деградация ферментов [3, 5]. Для решения этих проблем интегрируются алгоритмы Edge AI (Граничного ИИ). Edge AI позволяет обрабатывать данные непосредственно на чипе, фильтруя шум и выявляя аномалии до передачи. Это не только снижает объем передаваемой информации, что критично для энергетического бюджета, но и позволяет компенсировать дрейф сенсоров за счет использования адаптивных моделей [10].

Заключение. Проведенный анализ подтверждает, что переход к полностью автономным биосенсорным системам является не просто техническим усовершенствованием, а фундаментальным парадигмальным сдвигом в развитии носимой медицинской электроники. В ходе исследования показано, что ключевым фактором успеха такой трансформации является конвергенция трех научно-технологических направлений: междисциплинарного материаловедения (использование MXenes, УНТ и графена), передовой схемотехники сверхнизкого энергопотребления (алгоритмы MPPT и цепи холодного старта) и инновационных протоколов беспроводной связи (пассивный Backscatter).

Синергетическое объединение биотопливных элементов (BFC) и трибоэлектрических наногенераторов (TENG) позволяет эффективно нивелировать стохастический характер биоэнергетических процессов, обеспечивая энергетическую устойчивость системы как в состоянии покоя, так и при активных физических нагрузках. Интеграция гибких

суперконденсаторов и технологий Edge AI завершает архитектуру устройства, превращая его из простого преобразователя сигналов в интеллектуальный диагностический узел, способный функционировать в условиях прерывистого энергоснабжения.

Несмотря на достигнутые результаты в области повышения КПД харвестеров, на пути к массовому клиническому внедрению остаются открытые вопросы, связанные с биосовместимостью интерфейсов и долгосрочной стабильностью ферментативных катализаторов в условиях сложной химической среды человеческого организма.

В связи с вышеизложенным, перед научным сообществом встает важный исследовательский вопрос: «Сможем ли мы в ближайшее десятилетие преодолеть термодинамический барьер деградации биоферментных катализаторов, чтобы обеспечить стабильную плотность мощности, достаточную для реализации полностью автономных нейроморфных вычислений (On-chip Neuromorphic Computing) непосредственно на кожном покрове пациента?»

Список литературы

1. *Self-Powered Biosensors for Monitoring Human Physiological Changes* / J. Wang [et al.] // *Biosensors and Bioelectronics*. 2023. Vol. 224. P. 142–158.
2. *Energy Solutions for Wearable Sensors: A Review* / A. Smith [et al.] // *Advanced Materials*. 2021. Vol. 33, No 19. P. 45–62.
3. *From Lab to Life: Self-Powered Sweat Sensors and Their Future in Personal Health Monitoring* / C. Lee [et al.] // *ACS Sensors*. 2025. Vol. 10, No 2. P. 215–230.
4. *Recent Progress in Energy Harvesting Systems for Wearable Technology* / X. Chen [et al.] // *Nano Energy*. 2023. Vol. 106. P. 312–330.
5. *Using Cold-Start Circuits in Energy Harvesting Systems for Medical Implants* / M. Rossi, K. Patel // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2024. Vol. 39, No 4. P. 4510–4522.
6. *Flexible CNT/Graphene Supercapacitors* / Y. Zhang [et al.] // *ACS Nano*. 2024. Vol. 18, No 6. P. 5420–5435.
7. *Passive Wireless Communication* / T. Nguyen, S. Williams // *IEEE Transactions on Communications*. 2023. Vol. 71, No 8. P. 4812–4825.
8. *Backscatter Communication for Body Area Networks* / R. Gupta [et al.] // *Computer Networks*. 2024. Vol. 240. P. 110–125.
9. *Materials for Printed Bioelectronics* / E. Davis [et al.] // *Materials Today*. 2025. Vol. 82. P. 88–105.
10. *Edge Intelligence for Healthcare* / H. Kim, L. Chen // *Nature Electronics*. 2024. Vol. 7, No 1. P. 22–35.

UDC 615.47:681.586

DESIGN OF AUTONOMOUS SELF-POWERED WEARABLE BIOSENSOR SYSTEMS FOR LONG-TERM HEALTH MONITORING

Ahmed Sohaib

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Tumilovich M.V. – Dr. of Sci., Professor, Professor of the department of ETIT

Annotation. The article discusses the transition from traditional wearable IoT devices powered by lithium batteries to fully autonomous biosensor platforms. An advanced architecture is presented, combining hybrid energy harvesting based on enzymatic biofuel cells (BFC) and triboelectric nanogenerators (TENG). The study describes the integration of power management systems featuring MPPT algorithms, flexible nanostructured supercapacitors, and ultra-low-power passive communication channels (NFC, RF Backscatter). Aspects of carbon nanomaterial applications and Edge AI technologies are also considered. The proposed approach establishes a methodological framework for developing maintenance-free medical patch systems for continuous telemedicine monitoring.

Keywords: biosensors, wearable electronics, biofuel cells, nanogenerators, TENG, supercapacitors, passive telemetry, telemedicine, Edge AI.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВОЙ ПАЯЛЬНОЙ СТАНЦИИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПАЯЛЬНИКА ПРИ МОНТАЖЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Нестерович Е.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Алексеев В.Ф. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ПИКС

Аннотация. В статье проводится сравнительный анализ эффективности цифровой паяльной станции с микроконтроллерным управлением и традиционного электрического паяльника. Рассматриваются особенности конструкции, точность поддержания температуры и эксплуатационные характеристики устройств. Показано преимущество цифровых систем регулирования в обеспечении качества пайки и надежности электронных компонентов.

Ключевые слова: паяльная станция, паяльник, микроконтроллер.

Введение. Пайка является одним из наиболее распространенных и критически важных технологических процессов в производстве радиоэлектронных средств (РЭС). От качества выполнения паяных соединений напрямую зависят надежность, долговечность и безотказность работы электронных устройств, поскольку именно паяные соединения представляют собой наиболее уязвимый элемент конструкции с точки зрения возникновения отказов в процессе эксплуатации [1, с. 154]. В условиях постоянного усложнения РЭС, миниатюризации компонентов и ужесточения требований к надежности проблема обеспечения высокого качества пайки приобретает особую актуальность.

В современной практике монтажа и ремонта электронной аппаратуры используются два основных типа инструментов для выполнения паяных соединений. Первый тип – традиционный электрический паяльник (рисунок 1), представляющий собой нагревательный элемент, размещенный в металлическом корпусе, с медным жалом, передающим тепло в зону пайки. Мощность такого инструмента фиксирована, температура жала определяется балансом между подводимой тепловой мощностью и теплоотводом в окружающую среду и соединяемые детали [2, с. 26].



Рисунок 1 – Внешний вид традиционного паяльника

Второй тип – цифровая паяльная станция (рисунок 2), включающая в себя блок управления с микроконтроллером, источник питания и паяльник с датчиком температуры.

Микроконтроллер непрерывно отслеживает температуру жала и регулирует мощность нагрева для поддержания заданного значения с точностью до $\pm 5\text{--}10^\circ\text{C}$ [3, с. 44].



Рисунок 2 – Пример внешнего вида паяльной станции

Несмотря на очевидные функциональные преимущества паяльных станций (стабилизация температуры, возможность работы с различными типами компонентов, дополнительные сервисные функции), традиционные электрические паяльники остаются наиболее распространенным инструментом благодаря низкой стоимости, простоте конструкции и неприхотливости в эксплуатации [3, с. 27]. При этом в научно-технической литературе практически отсутствуют систематические исследования, посвященные количественному сравнению эффективности данных типов инструментов с точки зрения качества формируемых паяных соединений, производительности труда и надежности конечного изделия. Большинство публикаций сосредоточено на исследовании свойств припоев [4; 5; 7], вопросах усталостной прочности паяных соединений [7] или тепловых характеристиках отдельных элементов паяльного оборудования [2].

Отсутствие систематизированных данных о сравнительной эффективности цифровой паяльной станции и традиционного электрического паяльника создает проблему обоснованного выбора инструмента при организации производства или оснащении ремонтной мастерской, а также затрудняет оптимизацию технологических режимов пайки для каждого типа оборудования.

Целью исследований является экспериментальное сравнение эффективности цифровой паяльной станции и электрического паяльника при монтаже радиоэлектронных устройств на основе количественной оценки качества формируемых паяных соединений и анализа дефектности.

Основная часть. Традиционный электрический паяльник представляет собой простое устройство с нагревательным элементом мощностью 25-60 Вт и, чаще всего, медным жалом с покрытием. Температура жала формируется напрямую мощностью и теплоотдачей, поэтому при работе с массивными элементами она может снижаться на $40\text{--}60^\circ\text{C}$, а при длительном нагреве превышать $400\text{--}450^\circ\text{C}$, что существенно влияет на качество пайки и срок службы компонентов. Время выхода на рабочую температуру составляет 120-300 секунд, а точность поддержания режима ограничена $\pm 50^\circ\text{C}$ (см. рисунок 1).

Из-за отсутствия системы обратной связи увеличивается риск перегрева или недостаточного прогрева спаиваемого места, особенно при работе с чувствительными элементами SMD. Средний ресурс жала при активной эксплуатации составляет 1-2 года, после

чего появляются механические повреждения или накопление окислов, снижающих эффективность пайки.

Цифровая паяльная станция (см. рисунок 2) решает эти проблемы за счет интеграции термодатчика/термопары и микроконтроллера, управляющего мощностью нагрева через широтно-импульсную модуляцию. В современных моделях мощность жала составляет 50-80 Вт, диапазон регулирования температуры – 200-480°C, а точность поддержания заданного значения достигает $\pm 2^\circ\text{C}$. Время выхода на рабочую температуру составляет всего 15-30 секунд, что ускоряет рабочий процесс и снижает тепловые потери. Система обратной связи мгновенно реагирует на изменение нагрузки, предотвращая перегрев жала и электронных компонентов. Кроме того, в современных паяльных станциях стоит автоматическая защита, которая ограничивает максимальную температуру и отключает питание при превышении 480°C, что повышает безопасность работы.

Чаще всего в паяльных станциях используются никелированные жала, которые в отличие от медных окисляются гораздо меньше, комфорт их использования гораздо выше, а срок службы может достигать от 3 до 5 лет. Также в паяльных станциях не редко используются дополнительные выходы для работы с внешними устройствами, такими как паяльный фен или нагревательный стол для более эффективной работы с SMD компонентами.

Для наглядности представим сравнение изделий в таблице 1:

Таблица 1 – Сравнение характеристик паяльных инструментов

Параметр	Традиционный паяльник	Цифровая паяльная станция
Мощность	25-60 Вт	50-80 Вт
Диапазон температур	200-450°C	200-480°C
Точность поддержания температуры	$\pm 50^\circ\text{C}$	$\pm 2^\circ\text{C}$
Время выхода на рабочую температуру	120-300 сек	15-30 сек
Наличие защиты от перегрева	Нет	Есть, отключение при превышении 480°C
Контроль температуры	Нет	Автоматический, с обратной связью
Ресурс жала	1-2 года при активной эксплуатации	3-5 лет при активной эксплуатации
Тип жала	Медное/ медное с покрытием	Никелированное
Дополнительный функционал	Нет	Фен, нагревающийся стол

Таким образом, цифровая паяльная станция обладает преимуществами в точности поддержания температуры, скорости выхода на режим, долговечности и безопасности, тогда как традиционный паяльник остается более простым решением для нерегулярной или бытовой пайки.

Заключение. Сравнительный анализ показал, что цифровая паяльная станция существенно превосходит традиционный паяльник по точности поддержания температуры, времени выхода на рабочий режим, долговечности и функциональности. Традиционный паяльник целесообразно использовать для простых монтажных и бытовых работ, тогда как цифровая станция необходима при работе с компонентами, чувствительными к температурным колебаниям.

Использование микроконтроллерного управления повышает качество пайки, снижает риск повреждения компонентов и улучшает условия работы пользователя.

Цифровые паяльные станции являются более перспективным направлением развития паяльного оборудования и широко применяются как в профессиональной, так и в учебной деятельности.

Список литературы

1. Тресков, Б.А. Анализ моделей усталостной прочности припоев и паяльных паст / Б.А. Тресков // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы Всероссийской научно-технической конференции (г. Самара, 21-23 апреля 2020 г.) / Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева ; под ред. А.И. Данилина. – Самара : ООО «Вектор», 2020. – С. 154–155.
2. Московкина, Е. Паяльник или паяльная станция: сложности выбора / Е. Московкина // Технологии в электронной промышленности. – 2015. – Т. 6. – № 82. – С. 44–45.
3. Новоселов, В. Электрический паяльник инженера Сакса. История и современность / В. Новоселов // Компьютерные технологии. – 2000. – № 3. – С. 82–85.
4. Ланин, В.Л. Модификация паяльных паст углеродными наночастицами / В.Л. Ланин, А.В. Слижёва, Д.Ю. Ковалёв // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики : электронный сборник статей II Международной научно-практической конференции, Новополец, 14 ноября 2024 г. / Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой. – Новополец, 2025. – С. 140–145.
5. Ковалёв, Д.Ю. Упрочнение паяных соединений в электронных модулях / Д.Ю. Ковалёв, А.В. Слижёва, В.Л. Ланин // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : 21-я Международная молодёжная научно-техническая конференция : сборник научных трудов, Севастополь, 6–10 октября 2025 г. / Севастопольский государственный университет. – Москва-Севастополь : РНТОРЭС им. А.С. Попова : СевГУ, 2025. – № 8. – С. 126.
6. Тресков, Б.А. Анализ моделей усталостной прочности припоев и паяльных паст / Б.А. Тресков // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы Всероссийской научно-технической конференции (г. Самара, 21-23 апреля 2020 г.) / Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева ; под ред. А.И. Данилина. – Самара : ООО «Вектор», 2020. – С. 154–155.
7. Штенников, В.Н. Исследование тепловых характеристик паяльных стержней / В.Н. Штенников // Метрология. – 2017. – № 2. – С. 26–30.
8. Цифровая паяльная станция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cxem.net/mc/mc55.php>
9. Микроконтроллерные системы управления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cxem.net/mc/mc68.php>
10. Все, что нужно знать о паяльных станциях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://attentionrus.com/knowledgebase/articles/chto-takoe-payalnaya-stantsiya/>

UDC 621.396.6.002:621.791.3

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF A DIGITAL SOLDERING STATION AND AN ELECTRIC SOLDERING IRON IN THE ASSEMBLY OF RADIOELECTRONIC EQUIPMENT

Nesterovich Y.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Alexeev V.F. – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ICSD

Annotation. This article provides a comparative analysis of the efficiency of a digital microcontroller-controlled soldering station and a traditional electric soldering iron. Design features, temperature control accuracy, and operational characteristics of the devices are discussed. The advantages of digital control systems in ensuring soldering quality and the reliability of electronic components are demonstrated.

Keywords: Soldering station, soldering iron, microcontroller.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ НАРУШЕНИЯ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Карпинчик Г.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Дик С.К. – к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой ИКТ

Аннотация. В статье рассматривается разработка программного обеспечения для автоматизированного анализа электрокардиограмм с целью выявления нарушений сердечного ритма. В работе анализируются методы предварительной цифровой обработки ЭКГ-сигнала, алгоритмы обнаружения R-пигов и подходы к классификации аритмий. Предложена модульная архитектура системы, включающая блок фильтрации сигнала, модуль выделения диагностических признаков, алгоритм распознавания нарушений ритма и мобильный интерфейс отображения результатов.

Ключевые слова: электрокардиограмма, аритмия, цифровая обработка сигнала, программное обеспечение, Python, React Native Expo

Введение. Современные цифровые методы регистрации электрокардиограммы позволяют получать большие объемы данных о сердечной деятельности пациента. При этом ручной анализ ЭКГ требует значительных временных затрат и зависит от квалификации специалиста. Автоматизация обработки электрокардиографических записей позволяет ускорить поиск патологических изменений, повысить объективность анализа и использовать программные средства для первичного скрининга нарушений сердечного ритма.

Целью данной работы является разработка программного обеспечения для автоматизированного анализа электрокардиограмм, обеспечивающего фильтрацию сигнала, выделение диагностически значимых признаков и формирование заключения о наличии признаков аритмии.

Основная часть. Анализ методов цифровой обработки ЭКГ. Обработка электрокардиографического сигнала включает подавление дрейфа изолинии, фильтрацию сетевых и высокочастотных помех, обнаружение комплекса QRS и вычисление временных параметров сердечного ритма. В качестве базового метода детектирования характерных точек широко используется алгоритм Pan-Tompkins, позволяющий надежно выделять R-пики и рассчитывать интервалы RR. Для повышения качества распознавания аритмий дополнительно применяются методы извлечения морфологических и статистических признаков, а также алгоритмы машинного обучения и нейросетевые модели.

Используемые данные и алгоритмы классификации. Для обучения и тестирования систем автоматизированного анализа широко применяются открытые базы электрокардиограмм, в том числе MIT-BIH Arrhythmia Database и PTB-XL. На основе выделенных признаков могут определяться синусовая тахикардия, синусовая брадикардия, нерегулярный ритм и отдельные эпизоды экстрасистолии. В разрабатываемом программном обеспечении используется модульный подход, при котором этап предварительной фильтрации отделен от этапа классификации, что упрощает отладку и последующее расширение функциональных возможностей системы.



Рисунок 1 – Пример одноцикловой электрокардиограммы с основными элементами PQRST

АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ЭКГ



Рисунок 2 – Структурная схема алгоритма автоматизированного анализа ЭКГ



Рисунок 3 – Пример интерфейса мобильного приложения для отображения ЭКГ и результатов анализа

Архитектура и реализация приложения. Программное обеспечение разработано на языке Python, а пользовательский интерфейс мобильного приложения реализован средствами React Native Expo.

АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АНАЛИЗА ЭКГ



Рисунок 4 – Архитектура разработанного программного обеспечения анализа электрокардиограмм

Архитектура системы построена по модульному принципу и включает прием ЭКГ-данных, предварительную фильтрацию, выделение признаков, классификацию нарушений сердечного ритма и визуализацию результатов. Такой подход упрощает сопровождение программного обеспечения и позволяет расширять его функциональные возможности.

Заключение. В результате выполнения работы предложена структура программного обеспечения для автоматизированного анализа электрокардиограмм. Разработанная концепция объединяет методы цифровой обработки сигнала, алгоритмы выделения признаков и средства отображения результатов пользователю.

Список литературы

1. Pan J. A real-time QRS detection algorithm / J. Pan, W.J. Tompkins // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. – 1985. – Vol. 32, No. 3. – P. 230–236.
2. Wagner P. PTB-XL, a large publicly available electrocardiography dataset / P. Wagner, N. Strodthoff, R.-D. Boussejot [et al.] // *Scientific Data*. – 2020. – Vol. 7. – Art. 154.
3. Jha C.K. Automated cardiac arrhythmia detection techniques / C.K. Jha // *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. – 2025. – Vol. 28, No. 10. – P. 1639–1654.

UDC 004.4:616.12-073.97

SOFTWARE FOR AUTOMATED ANALYSIS OF ELECTROCARDIOGRAMS FOR DETECTING CARDIAC ARRHYTHMIAS

Karpinchik G.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Dik S.K. – Cand. of Sci.(Phys. and Math.), associate professor, Head of the Department of engineering and computer graphics

Annotation. The article discusses software for automated electrocardiogram analysis aimed at detecting cardiac rhythm disorders. Methods of ECG preprocessing, R-peak detection, feature extraction and arrhythmia classification are considered.

Keywords: electrocardiogram, arrhythmia, signal processing, software, Python

СИСТЕМА СКРИНИНГОВОЙ ДИАГНОСТИКИ НЕЙРОДЕГЕНЕРАТИВНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГРАФИЧЕСКИХ ПАТТЕРНОВ

Близнюк В.Д.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Дик С.К. - к. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой ИКТ

Аннотация. В статье рассматривается разработка мобильного приложения для скрининговой диагностики нейродегенеративных заболеваний на основе анализа графических паттернов, формируемых пользователем на сенсорном экране. Анализируются особенности регистрации траектории движения пальца, выделения признаков тремора и использования методов машинного обучения для автоматической оценки выраженности симптомов. Предлагается модульная архитектура программного обеспечения, включающая интерфейс пользователя, блок сбора данных, модуль предварительной обработки, подсистему выделения признаков и блок формирования результата. Интерфейс мобильного приложения предполагается реализовать с использованием React Native Expo.

Ключевые слова: нейродегенеративные заболевания, тремор, графические паттерны, мобильное приложение, машинное обучение, React Native Expo

Введение. Современное развитие мобильных и интеллектуальных технологий позволяет использовать массово доступные устройства для решения задач первичной скрининговой диагностики. Для нейродегенеративных заболеваний одним из информативных проявлений являются моторные нарушения, в частности тремор, который может быть выявлен по особенностям выполнения графических тестов на сенсорном экране.

Целью данной работы является разработка системы скрининговой диагностики нейродегенеративных заболеваний на основе анализа графических паттернов, выполняемых пользователем на экране мобильного устройства, с последующей автоматической обработкой результатов и оценкой выраженности симптомов.

Основная часть. Теоретические основы оценки тремора по графическим паттернам связаны с анализом пространственно-временных характеристик траектории. При выполнении пользователем спирали, линии или другого тестового шаблона система регистрирует координаты точки касания, временные метки, скорость движения и отклонение траектории от эталонной формы. На основе этих данных могут быть вычислены частота, амплитуда и вариативность колебаний, а также другие диагностически значимые признаки.

Используемые графические тесты и данные. Для построения и проверки алгоритмов могут быть использованы наборы данных Parkinson Disease Spiral Drawings Using Digitized Graphics Tablet и Improved Spiral Test Using Digitized Graphics Tablet for Monitoring Parkinson's Disease, содержащие примеры спиральных рисунков пациентов с болезнью Паркинсона и контрольной группы. В качестве дополнительных источников информации о треморе могут использоваться Parkinson's Disease Tremor Dataset (ALAMEDA) и Parkinson's Disease Smartwatch Dataset. Совместное использование таких данных позволяет формировать признаки как по траектории рисунка, так и по динамике двигательной активности.

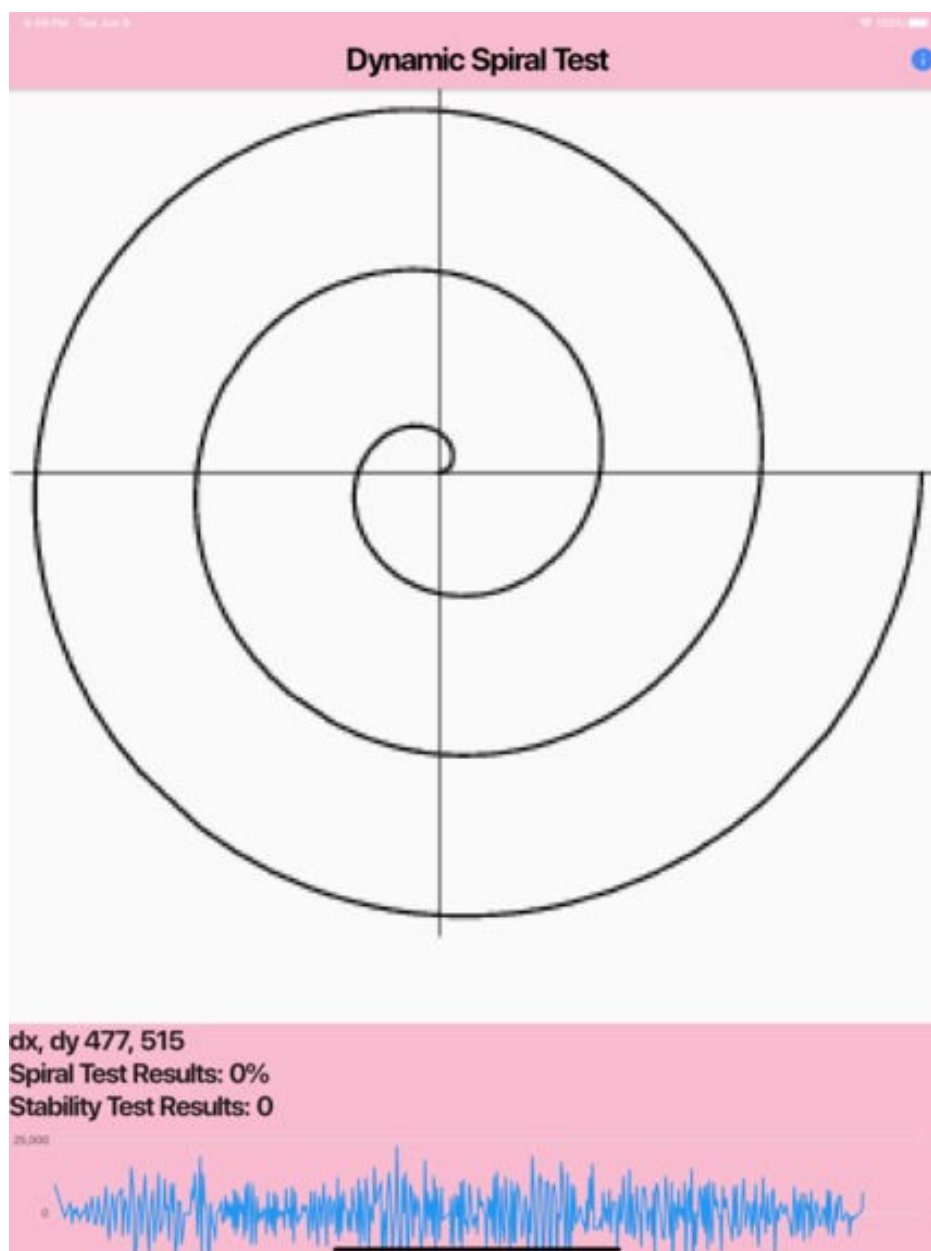


Рисунок 1 - Пример выделения признаков из графической траектории

Архитектура и реализация приложения. Интерфейс мобильного приложения предполагается реализовать на платформе React Native Expo. Архитектура системы строится по модульному принципу и включает экран проведения теста, модуль регистрации траектории, модуль предварительной обработки данных, блок вычисления признаков и подсистему интеллектуального анализа.

Архитектура системы обеспечивает возможность накопления результатов, сравнения текущих показателей с эталонными образцами и формирования итоговой оценки выраженности тремора. Использование модульного подхода упрощает последующее расширение функциональности, подключение новых графических тестов и интеграцию более сложных моделей машинного обучения.

Заключение. В результате выполнения работы сформирована концепция мобильной системы скрининговой диагностики нейродегенеративных заболеваний на основе анализа графических паттернов. Предложенная структура приложения обеспечивает регистрацию траектории движения пальца, вычисление признаков тремора и автоматическую оценку состояния пользователя. Разработанный подход может быть использован как основа для

дальнейшей реализации программного продукта и последующего обучения модели машинного обучения на специализированных наборах данных.

Список литературы

1. *Parkinson Disease Spiral Drawings Using Digitized Graphics Tablet* [Электронный ресурс]. - Режим доступа: *UCI Machine Learning Repository*.
2. *Isenkul M.E., Sakar B.E., Kursun O. Improved Spiral Test Using Digitized Graphics Tablet for Monitoring Parkinson's Disease.*
3. *Parkinson's Disease Tremor Dataset (ALAMEDA)* [Электронный ресурс]. - Режим доступа: *Zenodo*.
4. *Parkinson's Disease Smartwatch Dataset* [Электронный ресурс]. - Режим доступа: *PhysioNet*.

UDC 004.8:616.8-07

SCREENING DIAGNOSTIC SYSTEM FOR NEURODEGENERATIVE DISEASES BASED ON GRAPHICAL PATTERN ANALYSIS

Bliznyuk V.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Dik S.K. - Cand. of Sci. (Phys. and Math.), associate professor, Head of the Department

Annotation. The article presents a mobile application for screening diagnostics of neurodegenerative diseases based on graphical patterns drawn on a touchscreen. The system records the trajectory of finger movement, extracts tremor-related features and applies machine learning methods to assess symptom severity. The mobile interface is planned to be implemented using React Native Expo.

Keywords: neurodegenerative diseases, tremor, graphical patterns, mobile application, machine learning, React Native Expo

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВТОРИЧНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ И ПОТЕНЦИАЛА ДИАФРАГМЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ТИТАНА

Переписко Е.Ю.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Телеш Е.В. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. Исследовано влияние тока вторичного ионного пучка и потенциала диафрагмы на характеристики тонкопленочных покрытий из титана, полученных осаждением из ионного пучка. Установлено, что увеличение положительного потенциала на диафрагме способствовало снижению удельного объемного сопротивления, росту температурного коэффициента сопротивления, оптического пропускания и адгезии.

Ключевые слова: тонкие пленки, титан, ионный пучок, ускоритель с анодным слоем, оптические характеристики, электрофизические характеристики, механические характеристики, морфология поверхности

Введение. Тонкие пленки из титана широко применяются в технике. В микроэлектронике тонкие пленки титана используются в качестве диффузионного барьера между различными металлическими слоями. При производстве сенсорных дисплеев титановые пленки используются для улучшения проводимости и долговечности дисплея. В оптической индустрии тонкие пленки титана используются для покрытия линз и зеркал. Современная промышленность требует разработки и совершенствования методов получения тонких пленок тугоплавких металлов. Широко применяется электронно-лучевое испарение и магнетронное распыление для формирования тонкопленочных покрытий из титана [1].

Новый метод нанесения тонких пленок посредством генерации потока из пучкового фокуса, формируемого в ускорителе с анодным слоем, является перспективным, т.к. позволяет управлять плотностью и энергией ионного пучка, применять дешевые блоки питания [2,3]. В данной работе будет исследовано влияние параметров вторичного ионного пучка и потенциала диафрагмы на характеристики тонкопленочных покрытий из титана.

Основная часть. Исследования осуществляли с использованием ускорителя с анодным слоем, работающего в режиме ионно-пучкового фокуса, смонтированного в установке вакуумного напыления ВУ-1А. Покрытия наносили на подложки из стекла и кремния.

В таблице 1 приведены результаты измерений электрофизических и механических характеристик пленок титана.

Таблица 1 – Результаты измерений электрофизических и механических характеристик пленок титана

№ обр.	U _а , кВ	I _р , мА	I _п , мкА	U _д , В	d, нм	ρ _v , Ом·м	ТКС, К ⁻¹	k
1	1,5	30	20	0	30	5,3·10 ⁻⁵	-3,7·10 ⁻⁴	0,42
2	1,8	40	24	0	40	1,1·10 ⁻⁵	6,8·10 ⁻⁴	0,38
3	2,3	50	30	0	26	1,9·10 ⁻⁵	3,5·10 ⁻³	0,45
4	2,3	50	32	35	26	1,5·10 ⁻⁵	-1,3·10 ⁻³	0,42
5	2,3	50	35	63	25	3,9·10 ⁻⁵	-4,2·10 ⁻³	0,48
6	2,3	50	39	95	23	1,6·10 ⁻⁵	-5,0·10 ⁻³	0,58
7	2,3	50	44	135	20	0,3·10 ⁻⁵	-5,6·10 ⁻³	0,29

Коэффициент трения практически не зависел от тока вторичного ионного пучка и находился в пределах 0,38 – 0,45.

Оптическое пропускание в видимом диапазоне составило при малых значениях I_n 80 – 87 %, что также свидетельствует об окислении титана. Рост тока до 40 мкА привел к резкому снижению пропускания до 45 – 46 % (рисунок 1).

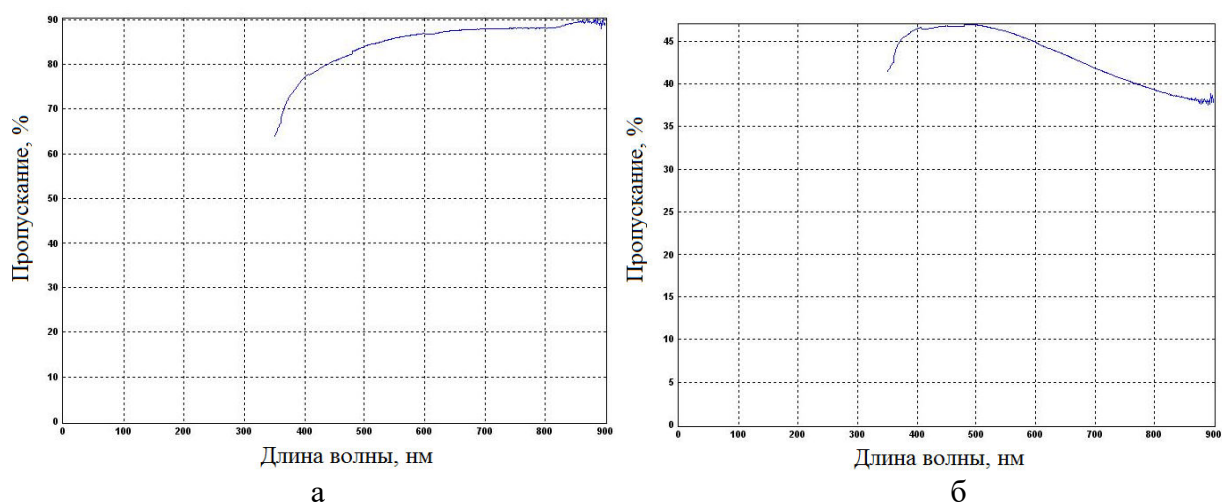


Рисунок 1 – Спектры пропускания пленок титана при токе вторичного ионного пучка 20 мкА (а) и 42 мкА (б)

Наличие положительного потенциала на диафрагме способствовало снижению удельного объемного сопротивления из-за формирования более плотной структуры покрытий, т.к. энергия конденсирующихся ионов вырастала. Это также подтверждается снижением коэффициента трения до 0, 29 при $U_d = 125$ В. Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) был отрицательным, его величина увеличивалась с ростом потенциала на мишени. Это можно объяснить увеличением химического взаимодействия между атомами и ионами титана и остаточными газами из-за увеличения их энергии.

На рисунке 2 представлены спектры пропускания пленок титана, полученных при потенциале диафрагмы 35 и 125 В и токе вторичного ионного пучка 40 мкА. Установлено небольшое увеличение пропускания в видимой области спектра и значительное – в инфракрасной.

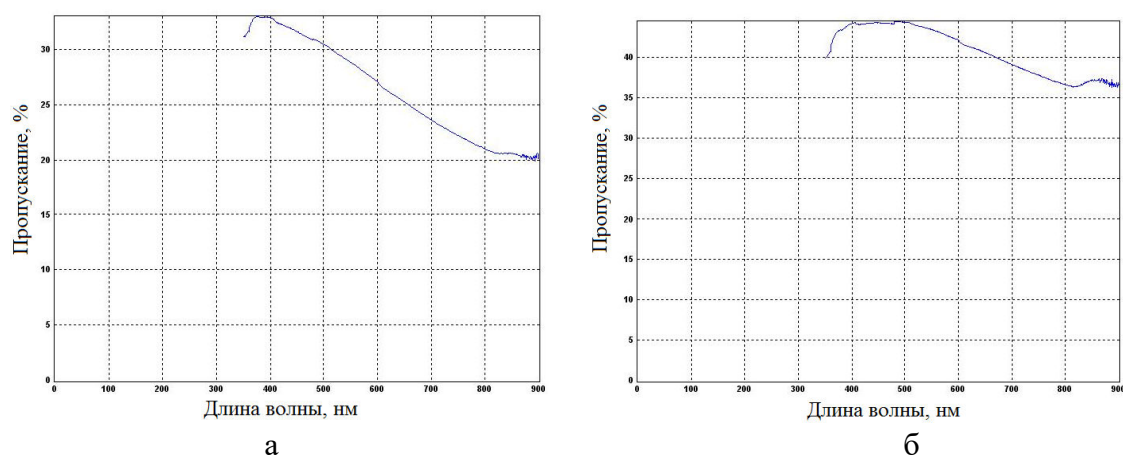


Рисунок 2 – Спектры пропускания пленок титана при потенциале диафрагмы 35 В (а) и 125 В (б)

На рисунке 3 приведена морфология поверхности покрытий из титана на подложке из кремния, полученных при различных потенциалах диафрагмы.

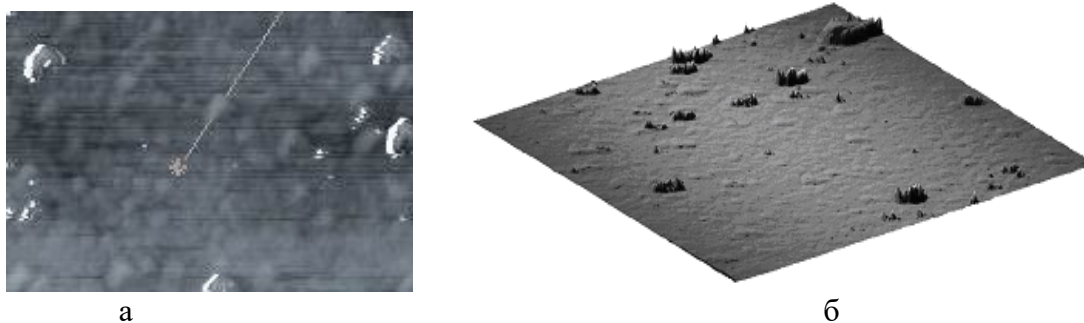


Рисунок 3 – Морфология покрытия из титана, полученного при потенциале диафрагмы 35 В (а) и 125 В (б)

Измерение адгезии покрытий на подложках из кремния методом насечек показало, что при росте $I_{\text{п}}$ и $U_{\text{д}}$ она составляла 4В – 5В по шкале ASTM, что также связано с повышением плотности покрытия из-за высокой энергии конденсирующихся ионов. Адгезия на стеклянных подложках была ниже – 3В – 4В.

Закключение. Проведенные исследования позволили определить влияние параметров вторичного пучка и потенциала диафрагмы на характеристики покрытий из титана. Установлено, что увеличение положительного потенциала на диафрагме способствовало снижению удельного объемного сопротивления, росту температурного коэффициента сопротивления, оптического пропускания и адгезии. В тоже время зависимость механических характеристик от вышеуказанных параметров имела неоднозначный характер.

Список литературы

1. Ибраев, Н.Х. Получение пленок титана методом магнетронного распыления для синтеза пористых пленок диоксида титана/ Н.Х. Ибраев, Д.А. Афанасьев, Т.М. Сериков, Г.С. Аманжолова// Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». – № 4(80). – 2015. – С. 48 – 56.
2. Машиев, Ю.П. Ионно-лучевая обработка: осаждение тонких пленок из низкоэнергетичного пучка ионов / Ю.П. Машиев, С.Л. Шевчук // Труды ФТИАН, 2005. – Т.18. – С.148 – 160.
3. Гутенко, Н.Д. Формирование тонких пленок алюминия прямым осаждением из ионного пучка/ Н.Д. Гутенко, Е.Ю. Перепечко // Физика конденсированного состояния [Электронный ресурс] : материалы XXXIII Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 3 – 4 апр. 2025 г. / ГрГУ им. Янки Купалы, физ.-техн. фак. ; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.), Н. Г. Валько (зам. гл. ред.) [и др.]. – Объем электрон. дан. 16,3 Мбайт, 40,0 уч.-изд. л. – Гродно: ГрГУ, 2025. – С. 28 – 30.

UDC 621.793.184

STUDY OF THE INFLUENCE OF SECONDARY ION BEAM PARAMETERS AND APERTURE POTENTIAL ON THE CHARACTERISTICS OF THIN-FILM TITANIUM COATINGS

Perepechko E.Y.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Telesh E.V. – senior lecturer

Annotation. The influence of secondary ion beam current and aperture potential on the characteristics of thin-film titanium coatings obtained by ion beam deposition was studied. It was found that increasing the positive potential at the aperture resulted in a decrease in specific volume resistance and an increase in the temperature coefficient of resistance, optical transmittance, and adhesion.

Keywords. Thin films, titanium, ion beam, anode layer accelerator, optical characteristics, electrophysical characteristics, mechanical characteristics, surface morphology

THE EFFECT OF COLD PLASMA ON THE INHIBITION OF THE GENUS STAPHYLOCOCCUS BACTERIA

Provlockaya D.V., Panfilenko E.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Klokov A. G. – Cand. Of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Foreign Languages

Kotov D.A. – Cand. Of Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Micro- and Nanoelectronics

Annotation. Experimentally investigated the effect of cold plasma of dielectric barrier discharge on inhibition of bacteria of the staphylococcus family. It has been determined that when cleaning the coaxial discharge system in a fazzle with a gas flow rate of 180 l/h, a capacity of 40 W and a distance of 15 mm, full inactivation of the staphylococcus was reached within 10 minutes. For surface discharge, a similar effect was observed at 50 W, 10 mm distance and 15 minutes processing time.

Keywords: atmospheric plasma, coaxial discharge system, surface discharge, staphylococcus, inhibition

Introduction. Given the high pathogenicity and potential danger of staphylococci (*Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus saprophyticus*) that can cause a wide range of infectious diseases, there is an urgent need to develop and implement new effective methods of disinfection, providing reliable inactivation of micro-organism data on different types of surfaces and objects in the external environment.

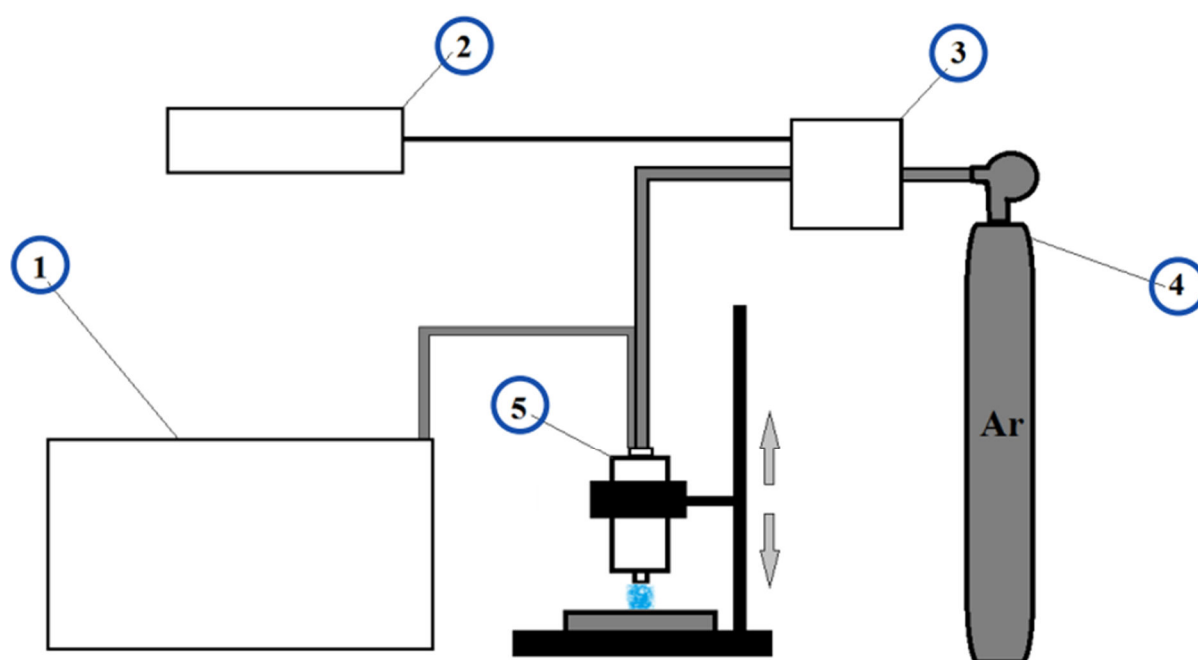
Bacteria of the genus *Staphylococcus*, including *Staphylococcus aureus* and coagulation-negative species (*Staphylococcus saprophyticus*), are among the most common human pathogens. They cause a wide range of diseases, from superficial pyoderma to severe invasive infections (pneumonia, endocarditis, osteomyelitis), as well as toxicosis. The threat is the spread of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) strains that are resistant to most β -lactam antibiotics [1]. The ability of staphylococci to form biofilms on the surface of medical implants and catheters further complicates therapy and requires new, nonscientific approaches to antimicrobial treatment.

Cold plasma is a partially ionized gas containing an unbalanced mixture of electrons, ions, neutral atoms, excited molecules and photons with temperatures close to the room. Plasma-generated active forms of oxygen and nitrogen, UV radiation and charged particles have a powerful bactericide effect, damaging the walls, membranes, proteins and DNA of microorganisms [2,3]. At the same time, the low plasma temperature allows biological tissues to be treated without risk of thermal damage.

It has been generally established that cold plasma can be an effective way to affect biological tissues in order to achieve various effects: antibacterial effect and inactivation of viruses, biocatalyst (aid in the decomposition of substances alien to the body – xenobiotics), for the treatment of diseases, associated with chronic inflammation and dangerous changes in the structure of proteins, which cause them to lose their function. Separately and actively discussed is the role of other plasma products – ozone and peroxydinitrite – in bactericidal activity, that is, in direct destruction of microbes, which makes it a promising antiseptic. Thus, the interest in cold plasma applications in medicine and the need to develop effective and safe clinical protocols require deciphering key mechanisms of plasma influence on cells and tissue.

In this article, the author shows that a key role in the mechanism of inactivation is played by active forms of oxygen and nitrogen (in particular, atomic oxygen), generated by plasma and causing irreversible damage to cellular structures. The results confirm the prospects of using developed plasma sources to create effective and safe disinfection systems.

Basic Concepts. A system of atmospheric discharge plasma generation was used to clean the surface of the substrates. A schematic of the atmospheric plasma generation system is shown in Figure 1.



1 – power supply; 2 – control and power unit WP-12; 3 – gas flow regulator; 4 – gas cylinder (Ar); 5 – discharge system

Figure 1 – Diagram of an experimental coaxial type discharge system with dielectric barrier spread

Basic characteristics of the plasma generation system:

- type of discharge – dielectric barrier;
- Discharge power >40 W
- Working gas flow rate 70-350 l/min
- Gas type – Ar

Among the many ways of creating a diffused dielectric barrier discharge, the simplest technical implementation is the coaxial configuration of the discharge system. When the gas passes through a tube in the area between the electrodes, atmospheric discharge is formed.

Two types of discharge systems were used to generate dielectric barrier plasma (DRB) at atmospheric pressure:

- coaxial discharge system;
- a planar discharge system.

The coaxial discharge system is a dielectric tube with metal electrodes inside and outside it (Figure 2). The quartz tube has an external diameter of 8 mm. The internal electrode is a hollow metal rod with a diameter of 1 mm. The outer electrode consists of a copper foil closely attached to a quartz tube, 10 mm wide.

The gas is continuously pumped through the discharge system, thereby removing heat from the discharge zone, excited particles and products of various plasma chemical reactions that typically impair the stability and performance of the discharge.

This discharge system provides a temperature in the processing area below 40 °C, as well as high stability by inhibiting streamer through a dielectric barrier between electrodes.

The planar discharge system is designed for handling large areas and consists of two flat electrodes, one of which is covered by a dielectric barrier.

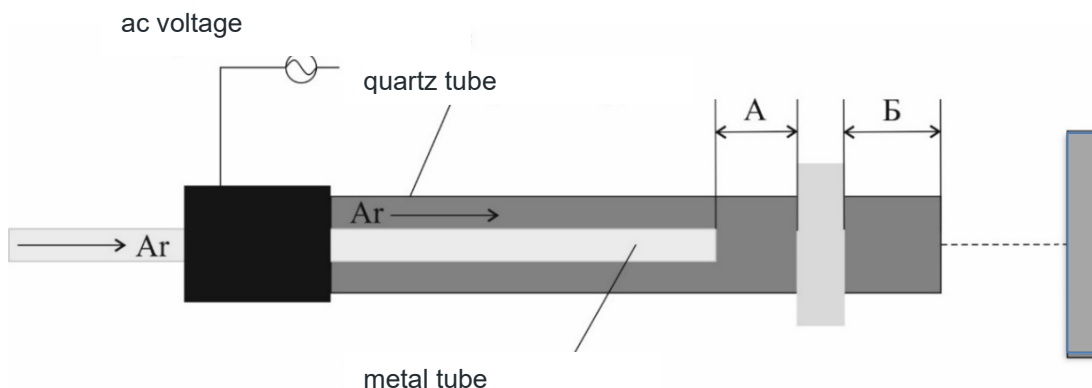


Figure 2 – Diagram of an experimental coaxial type discharge system with dielectric barrier spread

Growth of culture. Two species of bacteria of the genus *Staphylococcus* have been used as test cultures:

- *Staphylococcus aureus* is a gram-positive coccus with a wide range of pathogenicity and clinical significance.
- *Staphylococcus saprophyticus* - a causative agent of extracorporeal infections, also used as a model object.

Cultures are provided by the microbiology laboratory of the biological faculty of BSU.

The planting of microorganisms was carried out in a continuous layer on the surface of the dense nutrient medium in petri dishes using a bacteriological loop in the area of the burner flame. The flame heats the surrounding air, causing a local upward flow of air from the working surface, which reduces the likelihood of aerosols, dust and unwanted microorganisms that do not participate in the experiment. Continuous planting is a method of cultivating microorganisms in a solid nutrient medium, where the surface of the agar-agar is evenly covered by a microbial suspension to produce uniform monotone growth throughout the entire area of the petri dish.

The cultivation of *staphylococcus* requires a specially prepared nutritional environment, which is associated with control of growth conditions, reproducibility of results, safety and diagnostic informational. For the preparation of a nutritious medium, chicken fillet and agar-agar are needed as a source of proteins and amino acids, while agar-agar serves as a solid gel-forming component. The chicken fillet needs to be cooked, and the resulting broth needs to be filtered. In the hot solution, the agar-agar is dissolved so that when cooled it will freeze and form a floorboard surface suitable for growing colonies. The mixture is sterilized in alcohol flames to exclude foreign microorganisms, then the solution is distributed over sterile petri dishes where it is fixed and ready for stapling of the staph. Cultivated *Staphylococcus aureus* and *Staphylococcus saprophyticus* are shown in figures 3 and 4.

Petri cups with a seeded surface were treated with a plasma torch at a distance of 10–15 mm from the slit of the discharge system nozzle to the surface of the medium. The processing time (from 1 to 15 minutes) and discharge power (40 and 60 W) varied. The plasma gas flow rate (argon) was 130–180 L/h.

After processing, petri dishes were placed in a thermostat for incubation at the optimal temperature. The effectiveness of disinfection was assessed by a visual method that took into account the number of colonizing units grown on the surface of the nutrient medium. The degree of inhibition was defined as the percentage ratio of the number of colonies that grew in treated and control (untreated) cups.

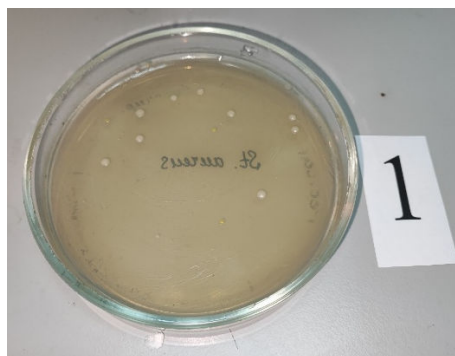


Figure 3 – Cultivated *Staphylococcus aureus*

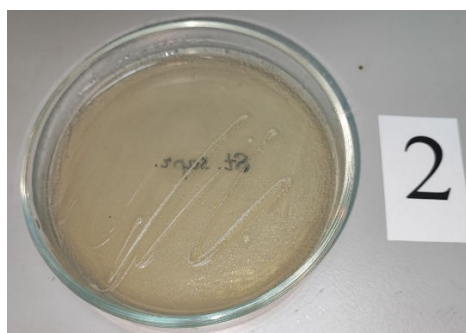


Figure 4 – Cultivated *Staphylococcus saprophyticus*

Results. Experiments on the disinfection of a staphylococcus-populated surface of a nutrient medium have demonstrated the high efficiency of the plasma sources developed. The static analysis did not reveal significant differences in plasma sensitivity between gold and saprophyte staphylococcus, allowing the data for both species to be considered together.

Figure 5 shows the dependency of the bacterial inhibition percentage on the processing time for coaxial system. It can be seen that the process of inactivation has a pronounced time dependency. At 40 W and 15 mm, full inhibition (100% bacterial death) was achieved after 10 minutes of processing. The increase of capacity to 60 W allowed a reduction in the time for full disinfection to 10 minutes, with inhibition of more than 90% of colonies observed after 5 minutes of treatment.

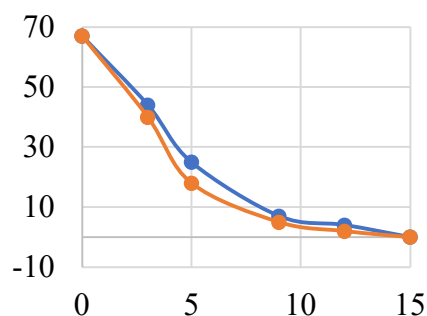


Figure 5 – Percentage of inhibition per surface treatment time

Conclusion. During the work, it was determined that for a coaxial discharge system with a gas flow rate of 180 l/h, a capacity of 40 W and a distance of 15 mm, full inactivation of the staphylococcus could be achieved in 10 minutes. For the surface discharge, a similar effect was observed at 50 W, 10 mm distance and 15 minutes processing time.

Thus, the numerical results confirm the energy efficiency and high antimicrobial activity of the dielectric discharge barrier plasma: optimal modes allow to form a stable flame up to 24 mm long, reduce energy consumption by 50%, and ensure complete disinfection of bacterial cultures in 10–15 minutes.

References

1. Fridman, G. *Applied Plasma Medicine* / G. Fridman [et al.] // *Plasma Processes and Polymers* / – 2008. – Vol. 5, № 6.
2. Laroussi, M. *Low Temperature Plasma in Medicine* / M. Laroussi. – Cambridge : Cambridge University Press, 2018. – 300 p.
3. Lukes P., Dolezalova E., Sisrova I., Chupek M. *Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: evidence for the formation of peroxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H₂O₂ and HNO₂* // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2014. – Vol. 23, № 1. – P. 015019. – <https://doi.org/10.1088/0963-0252/23/1/015019>.

УДК 537.525, 579.24

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ИНГИБИРОВАНИЕ БАКТЕРИЙ РОДА СТАФИЛОКОКК

Провлоцкая Д.В., Панфиленко Е.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научные руководители: Клокова А. Г. – к. ф. н., доцент, заведующая кафедры иностранных языков
Котов Д. А. – к. т. н., доцент каф. МНЭ

Аннотация. Экспериментально исследовано влияние холодной плазмы диэлектрического барьерного разряда на ингибирование бактерий рода стафилококк. Установлено, что при очистке в факеле коаксиальной разрядной системы с расходом газа 180 л/ч, мощностью 40 Вт и расстоянием 15 мм полная инаktivация стафилококка достигалась за 10 минут. Для поверхностного разряда аналогичный эффект наблюдался при мощности 50 Вт, расстоянии 10 мм и времени обработки 15 минут.

Ключевые слова: атмосферная плазма, коаксиальная разрядная система, поверхностный разряд, стафилококк, ингибирование

GSM-КОНТРОЛЛЕР ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНЫМ ТЕПЛОВЫМ ПУНКТОМ

Бурлыко А.И.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г.Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Кудина А.В – к.т.н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. GSM-контроллер является важным элементом системы автоматизации индивидуального теплового пункта. Он обеспечивает дистанционный контроль, оперативное управление и своевременное информирование о состоянии оборудования. Использование подобных устройств позволяет существенно повысить надежность теплоснабжения, сократить эксплуатационные расходы и обеспечить рациональное использование тепловой энергии.

Ключевые слова. GSM-контроллер, индивидуальный тепловой пункт, SCADA-система

Введение. GSM-контроллер представляет собой микропроцессорное устройство, предназначенное для дистанционного контроля и управления технологическим оборудованием посредством сетей сотовой связи. В составе системы автоматизации индивидуального теплового пункта (ИТП) он выполняет функции сбора, обработки, хранения и передачи информации о состоянии оборудования и параметрах теплоносителя. Применение таких устройств соответствует современным требованиям к цифровизации инженерных систем зданий и развитию концепции «умного здания» [1].

Основная часть. Основными функциями GSM-контроллера являются:

- измерение и регистрация технологических режимов (температура теплоносителя в контурах отопления и горячего водоснабжения, температура наружного воздуха, давление в системе отопления);
- сигнализация по падению давления в системах отопления и горячего водоснабжения;
- сигнализация по падению температуры в системах отопления и горячего водоснабжения;
- сигнализация аварийной остановки насосов;
- пожарная сигнализация и охранная сигнализация;
- вывод информации на встроенный LCD-дисплей;
- ввод настроек с клавиатуры;
- обмен SMS-сообщениями (отправка информационных сообщений, обработка и выполнение команд принимаемых SMS);
- удаленное включение/отключение насосов, запорно-регулирующей арматуры с электрическими сервоприводами;
- связь с приборами учета природного газа, тепловой и электрической энергии по интерфейсу RS-485 (протокол Modbus RTU);
- возможность опроса по GPRS с передачей данных на диспетчерский сервер.

Дополнительно современные GSM-контроллеры поддерживают подключение к облачным платформам мониторинга, где обеспечивается хранение архивов данных, построение графиков, формирование отчетов и интеграция с SCADA-системами [2]. Это позволяет организовать централизованное управление группой тепловых пунктов и реализовать автоматическую диспетчеризацию.

При срабатывании сигнализации осуществляется отправка SMS на установленный номер. По командам из SMS устройство должно отправлять информацию о текущих температурах и давлении в системе отопления и водоснабжения. В более современных

конфигурациях используется не только SMS, но и передача данных по протоколам TCP/IP через мобильную сеть, что повышает скорость обмена и надежность доставки информации [3].

Использование GSM-технологий позволяет обеспечить удаленный доступ к системе управления без необходимости постоянного присутствия обслуживающего персонала на объекте. Это особенно актуально для распределенных объектов теплоснабжения, расположенных в различных районах города или региона.

Индивидуальный тепловой пункт представляет собой комплекс технических средств, предназначенных для приема тепловой энергии от централизованной тепловой сети, преобразования параметров теплоносителя и распределения тепла между потребителями внутри здания. В соответствии с нормативными требованиями ИТП должен обеспечивать автоматическое регулирование параметров теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха и графика теплоснабжения [4].

Основные функции ИТП включают:

- регулирование температуры теплоносителя в системе отопления;
- обеспечение горячего водоснабжения;
- поддержание заданного давления;
- защиту оборудования от аварийных режимов работы;
- учет потребления тепловой энергии.

В состав ИТП входят теплообменники (пластинчатые или кожухотрубные), циркуляционные насосы, регулирующие клапаны с электроприводами, датчики температуры и давления, приборы учета тепловой энергии, а также шкаф автоматизации. Все элементы объединяются в единую автоматизированную систему управления, соответствующую требованиям по надежности и безопасности эксплуатации [5].

Работа системы осуществляется следующим образом. Датчики, установленные на трубопроводах и оборудовании, непрерывно измеряют параметры теплоносителя. Полученные сигналы поступают на входы контроллера, где преобразуются аналого-цифровыми преобразователями и анализируются в соответствии с заданным температурным графиком.

При отклонении параметров от установленных значений контроллер автоматически формирует управляющие сигналы на исполнительные механизмы – насосы и регулирующие клапаны. Таким образом обеспечивается поддержание требуемого температурного режима в здании при минимальном расходе тепловой энергии.

В случае возникновения аварийной ситуации (например, превышения давления, отказа насоса, обрыва датчика) контроллер немедленно отправляет уведомление ответственному лицу посредством SMS-сообщения или передачи данных через мобильную сеть. Оператор может дистанционно изменить параметры работы системы, выполнить перезапуск оборудования или временно отключить отдельные узлы.

Внедрение GSM-контроллера в систему управления ИТП обеспечивает ряд существенных преимуществ:

1 Снижение эксплуатационных расходов – уменьшается необходимость регулярных выездов обслуживающего персонала.

2 Повышение оперативности реагирования – аварийные уведомления поступают в режиме реального времени.

3 Экономия тепловой энергии – точное регулирование температуры позволяет сократить потребление на 10–20 % за счет погодозависимого регулирования [4].

4 Повышение надежности системы – постоянный мониторинг снижает риск серьезных аварий.

5 Ведение архива данных – позволяет анализировать эффективность работы оборудования и оптимизировать режимы эксплуатации.

С экономической точки зрения внедрение системы диспетчеризации ИТП позволяет сократить эксплуатационные расходы на обслуживание, снизить потери тепловой энергии и

увеличить срок службы оборудования. Окупаемость подобных решений в среднем составляет от 1 до 3 лет в зависимости от масштаба объекта и тарифов на энергоресурсы [2].

Устройство по функциональным возможностям не уступает более дорогостоящим системам на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) и значительно проще в эксплуатации. Алгоритм работы устройства способен обеспечивать гибкое управление оборудованием, что предусматривает возможность изменения конфигурации и настроек в процессе эксплуатации с помощью клавиатуры прибора, без разработки специальной программы как для ПЛК.

Современные тенденции развития автоматизации предполагают интеграцию GSM-контроллеров с облачными платформами мониторинга и диспетчеризации. Развитие технологий интернета вещей (IoT) позволяет объединять несколько ИТП в единую систему управления, обеспечивая централизованный сбор и анализ данных [3]. Применение методов машинного обучения и прогнозной аналитики дает возможность выявлять предаварийные состояния оборудования на ранней стадии и планировать профилактическое обслуживание.

В дальнейшем ожидается внедрение более совершенных стандартов связи (LTE-M, NB-IoT), расширение возможностей аналитики и применение методов прогнозирования аварийных ситуаций на основе накопленных данных. Это будет способствовать дальнейшему повышению энергоэффективности зданий и снижению затрат на теплоснабжение.

Заключение. Таким образом, применение GSM-контроллера в системе автоматизации индивидуального теплового пункта является эффективным техническим решением, обеспечивающим надежное управление, энергосбережение и повышение качества теплоснабжения потребителей.

Список литературы:

1. *Automation of buildings and structures : textbook / Edited by V. A. Bobkov. – Moscow : MGSU Publishing House, 2019. – p. 256.*
2. *Dispatching of building engineering systems / Edited by A. N. Smirnov. – Moscow : AVOK-PRESS, 2020. – p. 312.*
3. *Tanenbaum, A. Computer networks / A. Tanenbaum, D. Wetherall ; translated from English. – 5th ed. – Saint Petersburg : Piter, 2016. – p.960.*
4. *SP 60.13330.2020. Heating, ventilation and air conditioning : approved by the Order of the Ministry of Construction of the Russian Federation ; введ. 2020-12-30. – Moscow : Ministry of Construction of Russia, 2020. – p. 120.*
5. *Rules for technical operation of thermal power installations : approved by the Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated 24.03.2003 No. 115. – Moscow : Energoservis, 2018. – p. 176.*

UDC 53.087.4

GSM-CONTROLLER FOR MANAGING AN INDIVIDUAL HEATING STATION

Burlyko A.I.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Kydina A., – Cand. of Sci., associate professor, associate professor of the department of EET

Annotation. A GSM controller is an essential element of an individual heating substation's automation system. It provides remote monitoring, operational control, and timely notification of equipment status. The use of such devices significantly improves heat supply reliability, reduces operating costs, and ensures efficient use of thermal energy.

Keywords. GSM-controller, individual heating station, SCADA-system

ТЕРМОРЕГУЛЯТОР ПРОГРАММИРУЕМЫЙ С ЖК-ДИСПЛЕЕМ

Селивоненко Ю.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Кудина А.В. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ЭТТ, доцент кафедры ИИС

Аннотация. Существует большое количество устройств контроля температуры, однако они обладают рядом ограничений в части возможностей их эксплуатации в условиях с механическим, вибрационным, коррозионным воздействием, в частности на транспорте, ограниченными параметрами настройки, функциональными возможностями. Разрабатываемое устройство предполагает отсутствие вышеназванных недостатков.

Ключевые слова: терморегулятор, транспорт, механическое воздействие, вибрация, коррозия, функциональный

Введение. Устройства для контроля и управления источниками тепла, в частности электрическими источниками тепла, являются обязательным условием создания необходимого микроклимата в помещении, как неотъемлемого условия здорового и комфортного пребывания человека, как неотъемлемого условия сохранности многих предметов и продуктов при складировании и транспортировке.

Необходимость в контроле, управлении заданной температуры на производстве, в быту, на транспорте (в том числе железнодорожном), соответственно, с вероятными механическими, вибрационными, коррозионным воздействием, необходимость узкой настройки параметров, удаленного доступа, программной настройки, расширенных средств диагностики, определили необходимую компонентную базу устройства, исполнение платы, исполнение корпуса и устройства в целом, определили наличие средств контроля, индикации, управления, наличие средств подключения. Реализация устройства предполагает применение утвержденной методики расчетов [1], использование систем автоматизированного проектирования для разработки печатной платы (Altium Designer)[2], 3D-моделирования изделия (SolidWorks)[3], оформления конструкторской документации (AutoCAD)[4], проведение экономического обоснования.

Основная часть. В результате разработки будет реализован терморегулятор программируемый с ЖК-дисплеем для поддержания и контроля заданной температуры по двум линиям на 1500 Вт и 2000 Вт на базе производительного микроконтроллера [5], с Ethernet-модулем для проводного доступа к сети Интернет и локальной сети, с модулем Wi-fi для беспроводного доступа к сети Интернет и локальной сети, с внешними датчиками для контроля температуры в помещении, с внутренними датчиками для контроля температуры силовых блоков устройства, со встроенным вентилятором, с органами управления для регулировки параметров устройства вручную, с ЖК-дисплеем для отображения параметров, со средствами индикации. Для снижения механического, вибрационного, коррозионного воздействия на устройство используется коррозионностойкий, прочный, легкий, с отличными теплоотводящими свойствами корпус из алюминия с перфорацией, плата крепится на латунные стойки, что в дополнение к антивибрационным свойствам обеспечивает пространство под платой для циркуляции воздуха, плата демпфируется и защищается посредством многослойного покрытия лаком. На рисунке 1 представим структурную схему устройства без учета линий питания.

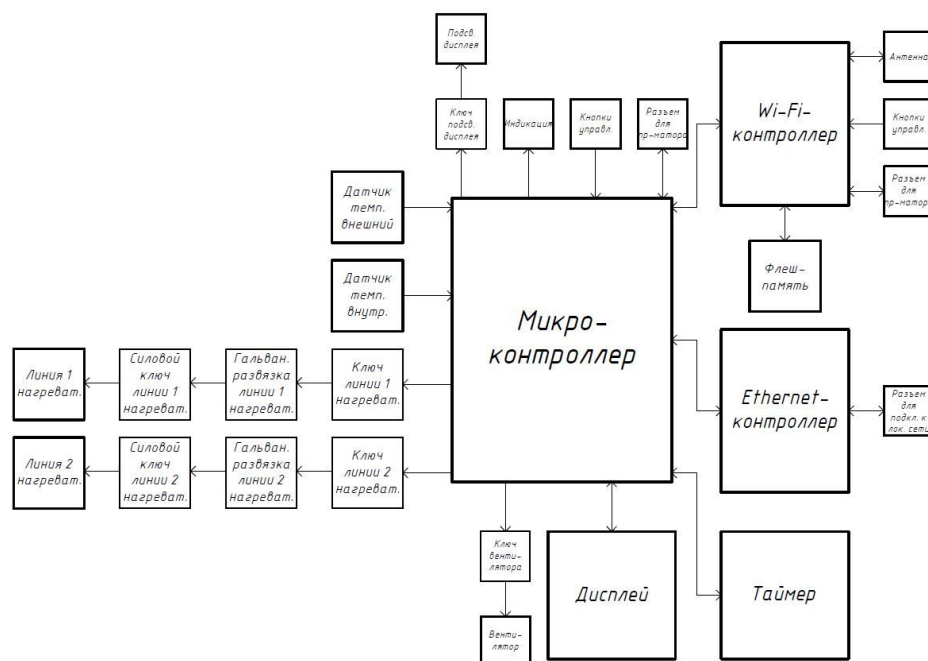


Рисунок 1 – Структурная схема устройства

Заключение. Исполнение устройства (плата, конструкция, корпус), позволяющее использовать его в условиях с повышенным механическим, вибрационным, коррозионным воздействием, универсальность (эксплуатация в производстве, на транспорте, в быту), достаточная мощность (обогрев помещений общей площадью порядка 40 м²), широкая настройка (возможность задания недельного графика с дискретностью в один час в устанавливаемых пределах), удаленный доступ к устройству, возможность подключения к микроконтроллеру для перепрошивки через внешний разъем, анализ температуры в помещении и контроль температуры внутри корпуса устройства, активное охлаждение делает его отличным от многих аналогов, представленных сегодня на рынке.

Список литературы

1. Достанко, А. П. Проектирование и производство РЭС. Дипломное проектирование : учеб. пособие /А. П. Достанко, В. М. Бондарик, С. В. Бордусов [и др.]; под общ. ред. А. П. Достанко. – Мн. : БГУИР, 2006. – 220 с.: ил.
2. Altium [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.altium.com>. – Дата доступа: 12.02.2026.
3. SOLIDWORKS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.solidworks.com>. – Дата доступа: 12.02.2026.
4. Autodesk [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autodesk.com>. – Дата доступа: 14.02.2026.
5. АС ЕНЕРГІЯ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://asenergi.com/catalog/microchip/controller/atmega32-16autqfp44.html>. – Дата доступа: 15.02.2026.

UDC 681.536.55

PROGRAMMABLE THERMOSTAT WITH LCD DISPLAY

Selivonenka Y.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Kudina A.V. – Cand. Of Csi., Associate Professor, Associate Professor of the Department of EEaT, Associate Professor of the Department of IaMS

Annotation. A large number of monitoring devices exist, but they have several limitations in terms of their ability to operate in conditions subject to mechanical, vibration, and corrosive influences, particularly in transport. They also have limited configuration parameters, functionality. The device being developed eliminates these shortcomings.

Keywords: thermostat, transport, mechanical impact, vibration, corrosion, functional

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

Коваленко И.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Мадвейко С.И. – к.т.н., доцент, заведующий кафедры ЭТТ

Аннотация. Проведен анализ особенностей применения сверхвысокочастотной (СВЧ) плазмы для удаления фоторезиста с полупроводниковых пластин в сравнении с традиционной высокочастотной (ВЧ) плазмой. Показано, что использование СВЧ-плазмы в downstream-режиме может обеспечивать степень диссоциации кислорода до 90%, что позволяет достичь скорости удаления фоторезиста 10–15 мкм/мин.

Ключевые слова: СВЧ-плазма, downstream-режим, радикальное травление, удаление фоторезиста.

Введение. Современная микро- и нанoeлектроника базируется на процессе фотолитографии, который позволяет формировать топологию интегральных схем (ИС) с элементами размером в несколько нанометров. Ключевое требование к производству – высокая чистота поверхностей на каждом этапе. В этом контексте плазменные технологии обеспечивают подготовку поверхности (очистку, активацию) и заключительное удаление временных масок (фоторезиста).

Традиционно в промышленности используется высокочастотная (ВЧ) плазма (13.56 МГц). Однако с ростом требований к скорости обработки, (минимизация радиационных дефектов и повышение селективности процессов) все большее внимание привлекает сверхвысокочастотная (СВЧ) плазма (2.45 ГГц). В данной статье проводится анализ особенностей применения СВЧ плазмохимического удаления фоторезиста в сравнении с классическими ВЧ методами

Основная часть. Плазменная очистка подложек используется для удаления адсорбированных паров воды и органических загрязнений. Это важно для повышения адгезии наносимого фоторезистивного слоя к поверхности материала (кремния, диоксида кремния или металлов) [1]. Здесь сравнение ВЧ и СВЧ плазмы показывает интересные различия. Обработка в ВЧ-плазме эффективно удаляет загрязнения за счет ионной бомбардировки, но может создавать дефекты в приповерхностном слое. Обработка в СВЧ-плазме, благодаря высокой плотности радикалов и низкой энергии ионов, позволяет проводить «мягкую» химическую очистку и модифицировать поверхностную энергию, делая ее гидрофильной без повреждения кристаллической решетки, что особенно важно для структур с ультратонкими диэлектриками.

Завершающая операция цикла литографии – удаление фоторезиста. После этапа травления защитная маска из фоторезиста должна быть полностью удалена без повреждения нижележащих слоев. Качество этой операции напрямую определяет успех последующих процессов.

Для реализации вакуумно-плазменных процессов используются различные типы разрядов, каждый из которых имеет свою область применения [1].

Высокочастотный (ВЧ) разряд (13.56 МГц) является индустриальным стандартом. Его основное достоинство – способность создавать плазму как в проводящих, так и в диэлектрических средах благодаря емкостному или индуктивному способу ввода энергии. Однако из-за наличия высокого потенциала само-смещения на электродах происходит ионная бомбардировка.

Сверхвысокочастотный (СВЧ) разряд (2.45 ГГц) при прочих равных условиях плотность ионизации выше, а также ниже и энергия ионов, что не приводит к ионной бомбардировке [1].

Взаимодействие плазмы с материалом можно разделить на несколько режимов.

Плазменное травление (ПТ) и радикальное травление (РТ) – процессы, протекающие по чисто химическому механизму. В их основе лежат гетерогенные реакции между нейтральными активными частицами (радикалами) и атомами обрабатываемого материала. Для удаления фоторезиста (органического полимера) используется атомарный кислород О, который окисляет пленку, превращая её в летучие продукты реакции (СО, СО₂, Н₂О) [1].

С уменьшением размеров элементов ИС чувствительные материалы, такие как low-k диэлектрики или ультратонкие слои металлов, становятся крайне уязвимы для воздействия заряженных частиц. Ионная бомбардировка и жёсткое ультрафиолетовое излучение из плазмы могут вызывать перезарядку и пробой тонких диэлектриков, увеличение шероховатости поверхности, имплантацию ионов в подложку, деградацию материала low-k (увеличение его диэлектрической проницаемости).

Поэтому главная перспектива развития плазменной очистки – вынос обрабатываемой пластины из зоны активного разряда. Это и есть радикальное (downstream) травление: пластина находится в зоне, отделённой от плазмы, и подвергается воздействию только нейтральных химически активных частиц (радикалов). Это позволяет полностью исключить повреждение структуры заряженными частицами и излучением.

Анализ патентной литературы [2] показывает несколько основных способов реализации «downstream» или «remote» плазмы:

Перфорированный экран: между зоной генерации плазмы и камерой обработки устанавливается металлическая стенка с множеством отверстий. Если размер отверстий меньше дебаевского радиуса экранирования (толщины слоя пространственного заряда у стенки), плазма не проникает через них. Ионы и электроны, сталкиваясь со стенками экрана, рекомбинируют. Нейтральные же радикалы свободно проходят через отверстия и диффундируют к пластине.

Удалённое расположение (Downstream): плазма генерируется в трубе или камере, удалённой от пластины на расстояние, значительно превышающее длину свободного пробега иона. Пока частицы движутся по трубе к пластине, ионы успевают рекомбинироваться на стенках, в то время как радикалы с большим временем жизни достигают подложки [1].

Все эти методы успешно работают как с ВЧ, так и с СВЧ разрядами. Но эффективность генерации радикалов и скорость, и качество удаления фоторезиста напрямую зависят от типа используемого источника. Именно здесь преимущества СВЧ-плазмы раскрываются наиболее полно.

Основной параметр, определяющий скорость удаления фоторезиста - концентрация атомарного кислорода. Эффективность образования радикалов зависит от плотности мощности, вкладываемой в газ. СВЧ-разряд при давлении 10-300 Па обеспечивает исключительно высокую степень диссоциации молекул кислорода от 50 до 90%, что значительно выше, чем в стандартном ВЧ-разряде (обычно 5-20%) [3]. Это достигается благодаря эффективному ускорению электронов в СВЧ-поле [1]. Высокая концентрация атомарного кислорода позволяет достигать скоростей удаления фоторезиста до 10-15 мкм/мин и выше, что критически важно для производительности линий.

Низкая энергия ионов в первичной СВЧ-плазме, а в режиме РТ – их полное отсутствие в зоне обработки, делает процесс «химически мягким». Это исключает ионную бомбардировку нижележащих слоев образца. Таким образом, достигается бесконечная селективность по отношению к материалу подложки, что принципиально невозможно в процессах, где пластина контактирует с плазмой (РИПТ, ПТ).

Заключение. Анализ особенностей плазмохимического удаления фоторезиста показывает, что применение СВЧ-плазмы, организованной по схеме радикального травления (downstream), является наиболее перспективным методом для современного производства ИС. По сравнению с традиционной ВЧ-плазмой, СВЧ-метод обеспечивает более высокую скорость

процесса за счет большей плотности атомарного кислорода, абсолютную селективность к подложке благодаря отсутствию ионной бомбардировки, минимальное радиационное повреждение чувствительных структур.

Список литературы

1. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. «Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов». М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Патент US 6,395,150 B1, «Plasma processing system for processing semiconductor wafers in a downstream radical dissociation process», 2002.
3. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. «Principles of Plasma Discharges and Materials Processing». 2nd Edition. Wiley-Interscience, 2005.

UDC 621.382.002.3:533.9

ANALYSIS OF THE FEATURES OF USING MICROWAVE PLASMA TO REMOVE PHOTORESIST FROM SEMICONDUCTOR WAFERS

Kovalenko I.A

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Madveika S.I. – Cand. of Sci., associate professor, head of department electronic technique and technology

Annotation. An analysis of the specific features of using microwave plasma to remove photoresist from semiconductor wafers was conducted, compared to traditional radio-frequency (RF) plasma. It was shown that using microwave plasma in downstream mode can achieve oxygen dissociation rates of up to 90%, enabling photoresist removal rates of 10–15 $\mu\text{m}/\text{min}$.

Keywords: microwave plasma, downstream mode, radical etching, photoresist removal.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ЕГО ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ

Тарногурская А.Д., Борисюк А.О.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Редьков В.М. – д.т.н., профессор, профессор кафедры физики

Аннотация. Экспериментально исследован принцип действия термоэлектрического преобразователя на основе модуля Пельтье TEC1-12706. В ходе работы измерялись температурные зависимости на горячей и холодной сторонах элемента при различных значениях напряжения питания. Установлено, что максимальное охлаждение «холодной» стороны (до 19,4°C) достигается при напряжении 2 В, тогда как дальнейшее увеличение напряжения приводит к ее нагреву из-за преобладания Джоулева тепла над эффектом Пельтье. Показано снижение эффективности элемента с ростом потребляемой мощности, при этом отмечена необходимость организации эффективного отвода тепла от горячей стороны для улучшения характеристик. Изготовлена действующая модель холодильной машины на основе элемента Пельтье и рассмотрены основные области практического применения данного эффекта. Полученные результаты могут быть полезны при проектировании компактных охлаждающих устройств и систем термостатирования.

Ключевые слова: термоэлектрический модуль, термоэлектрический преобразователь, элемент Пельтье, термоэлектрическое охлаждение, эффект Пельтье, коэффициент полезного действия, температурный градиент.

Введение. Термоэлектрические преобразователи представляют собой устройства, которые используют термоэлектрические эффекты для преобразования тепловой энергии в электрическую и наоборот. Преобразователи такого рода широко распространены благодаря своей относительно простой конструкции, надежности в работе и способности функционировать при различных температурах. Интерес к ним во многом связан с отсутствием движущихся частей и возможностью как прямого охлаждения, так и генерации электроэнергии. В последние годы потребность в термоэлектрических устройствах возрастает в связи с развитием компактной электроники и необходимостью локального охлаждения нагреваемых элементов без использования громоздких компрессоров.

Цель исследования: изучение принципа действия термоэлектрического преобразователя, его ключевых характеристик и возможностей применения для охлаждения или генерации энергии.

Объект исследования: разность температур, возникающая в термоэлектрическом преобразователе при пропускании через него электрического тока.

Предмет исследования: температура холодной и горячей поверхностей термоэлемента в зависимости от условий эксплуатации.

Гипотеза исследования: для создания систем охлаждения можно использовать перепад температур, возникающий при пропускании электрического тока через соединение двух разных материалов.

Основная часть. Для изучения принципа действия термоэлектрического преобразователя мы выбрали модуль элементов Пельтье TEC1-12706. Для изучения его основных параметров, модуль элементов Пельтье был расположен с помощью проводов таким образом, чтобы с обеих его сторон можно было измерять температуру. Напряжение в данной цепи менялось с помощью регулируемого источника питания. Для более точного измерения

силы тока использовался мультиметр. В ходе эксперимента постоянное напряжение на элементе повышалось с шагом 0,5 В, и после каждого повышения измерялась сила тока и температура, которые установились на «горячей» T_2 и «холодной» T_x частях элемента Пельтье.

Эксперимент показал, что температура «холодной» части элемента Пельтье уменьшалась до тех пор, пока напряжение не составило 2 В. В этот момент температура «холодной» части была равна 19,4°C, температура в помещении при этом была 22°C. При дальнейшем повышении напряжения начал происходить нагрев «холодной» части элемента Пельтье. Это объясняется тем, что при отсутствии механизмов для охлаждения элемента, выделение Джоулева тепла уже при небольших значениях протекающего тока начинает преобладать над эффектом Пельтье. Но, невзирая на это, разница температур между «горячей» и «холодной» сторонами элемента остается все еще достаточно заметной.

Также была рассчитана потребляемая элементом мощность. Было установлено снижение эффективности элемента Пельтье с ростом потребляемой мощности. Это объясняется тем, что величина выделяемого Джоулева тепла равна электрической мощности, потребляемой термоэлектрическим элементом. По этой причине эффективность элемента Пельтье с ростом напряжения значительно падает, и для максимального рабочего значения напряжения оказывается относительно небольшой. Эффективность элемента Пельтье можно повышать, обеспечивая отвод тепла от «горячей» части элемента.

Была изготовлена модель холодильной машины. Для нахождения её холодильного коэффициента мы определяли минимальную температуру, до которой может быть охлажден стакан с жидкостью, помещённый в холодильную машину. В режиме равновесия количество тепла, отводимого от стакана с водой, равно количеству тепла, получаемому стаканом от окружающей среды. Данная величина прямо пропорциональна разности температур стакана и окружающей среды.

Для определения мощности потока тепла, передаваемого стакану при фиксированной разности температур, использовали коэффициент теплопотерь

$$\eta = \frac{P_{\text{потерь}}}{IU} = 0,074.$$

Для оценки точности измерений все эксперименты проводились при стабильной температуре окружающей среды (22°C), а показания мультиметра и термометров фиксировались после выхода системы в стационарный режим, когда изменения температуры не превышали 0,1°C в минуту.

Заключение. Таким образом, в ходе выполнения работы был проведен сравнительный анализ зависимости нагрева «холодной» и «горячей» частей элемента Пельтье от приложенного напряжения; измерена вольтамперная характеристика элемента для зависимости разницы температур на поверхностях от потребляемой электрической мощности. В результате показано, что эффективность элемента Пельтье существенно падает с ростом напряжения.

Полученные данные могут быть полезны при выборе рабочего режима элемента Пельтье в реальных устройствах, где важно найти баланс между глубиной охлаждения и энергопотреблением. Можно отметить, что эффект Пельтье находит достаточно широкое практическое применение. Например, он используется для охлаждения микросхем и высокопроизводительных процессоров, где нужен локальный отвод тепла. В медицине такие элементы применяются в устройствах, требующих точного термостатирования. Благодаря компактности и отсутствию движущихся частей, модули Пельтье также используются в автомобильных холодильниках и некоторых моделях кондиционеров.

Список литературы

1. Л. А. Исаченкова, А. А. Сокольский Физика: учеб. пособие для 10-го кл. учреждений общ. сред. образования с рус. яз. обучения / Л. А. Исаченкова, А. А. Сокольский. – 1-е изд., пересмотр. и доп. – Минск: Народная асвета, 2019. – 287 с.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики в 3-х т. Т. 2 / И. В. Савельев. – М.: Наука, 1989.
3. Кингсеп, А.С. Основы физики. Курс общей физики: Учебн. в 2 т. Т. 1. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика / А.С. Кингсеп, Г.Р. Локишин, О.А. Ольхов; под ред. А.С. Кингсеп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 560 с.
4. Булат Л. П., Ведерников М. В., Вялов А. П. и др. Термоэлектрическое охлаждение. Текст лекций под общей ред. Л. П. Булата. СПб.: СПбГУНПП, 2002.
5. Иоффе А. Ф., Стильбанс Л. С., Йорданишвили Е. К., Ставицкая Т. С. Термоэлектрическое охлаждение. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956.
6. Википедия. Свободная энциклопедия. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org> – Дата доступа 06.03.2026

UDC 537.322.15

STUDY OF THE OPERATION OF A THERMOELECTRIC CONVERTER AND ITS POTENTIAL APPLICATIONS

Tarnogurskaya A.D., Borisyyuk A.O.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Redkov V.M. – Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Physics

Annotation. The operating principle of a thermoelectric converter based on a TEC1-12706 Peltier module was experimentally studied. Temperature dependences on the hot and cold sides of the element were measured at various supply voltages. It was found that maximum cooling of the «cold» side (up to 19.4°C) is achieved at a voltage of 2 V, while a further increase in voltage leads to its heating due to the predominance of Joule heating over the Peltier effect. A decrease in the element's efficiency with increasing power consumption is demonstrated, while the need for efficient heat removal from the hot side to improve performance is noted. A working model of a refrigeration machine based on a Peltier element is constructed, and the main areas of practical application of this effect are discussed. The obtained results can be useful in the design of compact cooling devices and thermostatic control systems.

Keywords: thermoelectric module, thermoelectric converter, Peltier element, thermoelectric cooling, Peltier effect, efficiency, temperature gradient.

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Навумчик П.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Собчук Н.С. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. Поскольку сцинтилляционные кристаллы в средствах радиометрии и дозиметрии являются как никогда актуальными, предлагается вариант стенда для исследования сцинтилляционных кристаллов, с подключением к персональному компьютеру по USB-C, регулировкой параметров стенда и снятия сигнала внешним аналого-цифровым преобразователем.

Ключевые слова: сцинтиллятор, SiPM, фотоумножитель, микроконтроллер, ионизирующие излучение

Введение. Для обеспечения радиационной безопасности населения и различных исследований необходимы сцинтилляционные кристаллы, что вызывает потребность к созданию вариантов исследовательских установок и стендов для исследования свойств сцинтилляционных кристаллов. Большинство существующих промышленных измерительных комплексов обладают высокой стоимостью и избыточной функциональностью, что ограничивает их применение в учебных и научно-исследовательских лабораториях

В данной статье автором предложен вариант стенда, в основе которого лежит работа с кремниевым фотоумножителем и сцинтилляционными кристаллами.

Основная часть. Формирование и обработка аналогового сигнала требуют точного согласования усилителя с входной ёмкостью фотодетектора и минимизации паразитных связей, что критично для сохранения формы импульса и отношения сигнал/шум.

Устройство для исследования характеристик сцинтилляционных кристаллов. Данное устройство используется для получения спектральных данных с исследуемого образца кристалла, для измерения параметров импульсов, полученных в результате воздействия ионизирующего излучения на сцинтилляционный кристалл. Напряжение питания ФЭУ составляет от -26 до -33 В, время измеряемого импульса должно находиться в рамках от 1 до 100 мкс., измеряемая амплитуда – от 0,1 до 1,1 В.

Снятие энергетического спектра и временной формы импульсов осуществляется с применением внешнего высокоскоростного АЦП, поскольку встроенные преобразователи микроконтроллеров не обеспечивают требуемого соотношения частоты дискретизации и разрядности. Подобные АЦП позволяют регистрировать сигналы длительностью единицы-десятки наносекунд и проводить их последующую цифровую обработку на персональном компьютере [1], [2].

Функциональное управление стендом, включающее установку и стабилизацию напряжения смещения, измерение температуры и обмен данными с ПК, реализуется на базе микроконтроллера STM32L452RET6. Данный контроллер характеризуется низким энергопотреблением и достаточной производительностью для задач управления и интерфейсного обмена. Связь с компьютером может осуществляться через интерфейсы UART или USB, что обеспечивает возможность удалённого контроля и автоматизации экспериментов.

Прототипом целесообразно считать патент CN 106597569 A (Multifunctional scintillation crystal testing platform), описывающий многофункциональный стенд для исследования сцинтилляционных кристаллов. Данное решение включает регулируемое питание, модульную структуру измерительных каналов, возможность контроля температуры и интерфейс связи с

персональным компьютером [3]. По функциональному назначению и принципам организации система наиболее близка к разрабатываемому стенду, рисунок 1.1. Патент US 10,564,299 B2 (Temperature compensation and bias stabilization for SiPM modules) можно считать вспомогательным аналогом – он отражает отдельный узел проектируемого стенда (систему температурной стабилизации и управления смещением SiPM), рисунок 1.

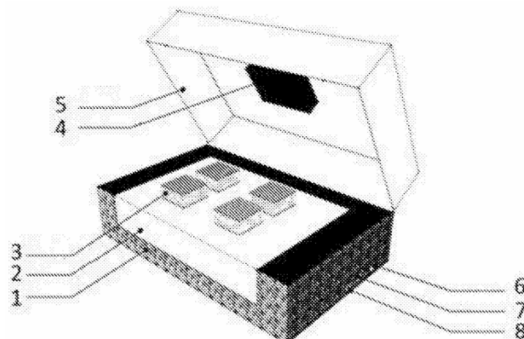


Рисунок 1 – Макет устройства исследовательской установки CN 106597569 A

Сравнение существующих лабораторных решений показывает, что большинство стендов ориентировано на измерение интегральных характеристик (световой выход, энергоразрешение), тогда как универсальные системы, позволяющие исследовать форму сцинтилляционного импульса и управлять параметрами SiPM в автоматическом режиме, встречаются ограниченно и часто реализуются в виде исследовательских установок.

Предложенный стенд отличается использованием малошумящего усилителя OPA656, управлением рабочими параметрами через STM32L452RET6 и применением внешнего АЦП для точного снятия формы сигнала. Такое сочетание компонентов обеспечивает высокую воспроизводимость измерений, возможность дистанционного управления и адаптацию к различным типам сцинтилляционных кристаллов.

Кроме того, стенд предусматривает внешнюю оцифровку сигнала с помощью высокоскоростного АЦП и модульную архитектуру с возможностью подключения к ПК, что обеспечивает гибкость экспериментов и удобство сбора данных. Среди аналогов лишь частично реализованы отдельные функции, такие как управление питанием, температурная компенсация или модульность, однако ни одно решение не объединяет их все в единой системе.

Для большего понимания рассмотрим структурную схему устройства, рисунок 2.

В состав устройства входят следующие функциональные блоки: блок связи с ПК и питания, блок стабилизации напряжения, блок фильтра опорного напряжения, блок управления, блок накачки напряжения смещения, блок регулировки, блок усиления сигнала и блок внешнего двухполярного питания.

Блок связи с ПК и питания обеспечивает обмен данными между устройством и компьютером, а также питание устройства через порт USB. По линии USB подаётся напряжение +5 В, используемое для питания цифровых цепей и формирования опорных напряжений.

Блок стабилизации напряжения 3,3 В служит для формирования стабильного питающего напряжения микроконтроллера и других цифровых узлов. Наличие стабилизатора необходимо для обеспечения надёжной работы логических цепей при возможных колебаниях напряжения на шине USB.

Блок фильтра опорного напряжения отделяет аналоговую часть устройства от цифровой, снижая уровень пульсаций и помех. Фильтр обеспечивает чистое и стабильное опорное напряжение для АЦП микроконтроллера, а также для блока регулировки и накачки напряжения смещения, что особенно важно при работе с малыми аналоговыми сигналами.

Блок управления, построенный на микроконтроллере STM32L452RET6, выполняет функции централизованного контроля и управления всеми процессами. Он задаёт параметры накачки, контролирует уровень смещения SiPM, управляет обменом данными с ПК, а также обеспечивает работу вспомогательных модулей. От его корректной работы зависит стабильность функционирования всего устройства.

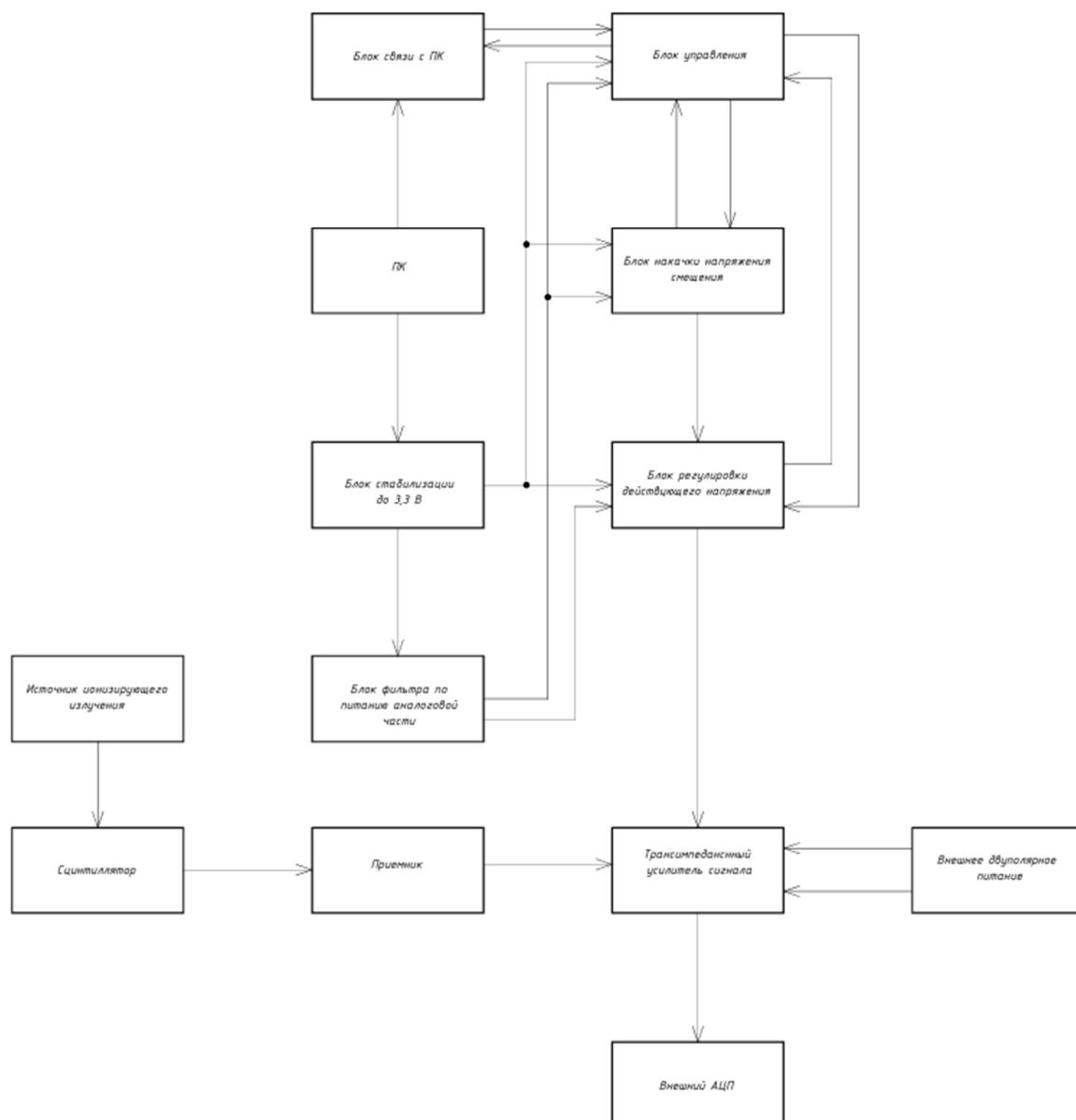


Рисунок 2 – Структурная схема устройства

Блок накачки напряжения смещения формирует отрицательное напряжение порядка – 33 В, необходимое для питания фотоприёмника SiPM. Напряжение генерируется по сигналам от блока управления и поступает на блок регулировки, где производится его точная подстройка.

Блок регулировки осуществляет измерение и стабилизацию действующего напряжения смещения, подаваемого на SiPM. При отклонении уровня от заданного диапазона блок посылает управляющий сигнал в микроконтроллер, который корректирует выходное напряжение накачки, поддерживая стабильную работу фотоприёмника.

Блок усиления сигнала принимает слабый токовый сигнал от SiPM и преобразует его в напряжение, подходящее для дальнейшей обработки внешним АЦП. Усилитель также

согласует импеданс между фотоприёмником и измерительным трактом, минимизируя искажения и шумы.

Блок внешнего двухполярного питания обеспечивает операционный усилитель напряжением ± 6 В. Данное питание должно обладать минимальным уровнем шумов и пульсаций, поскольку качество усиленного сигнала напрямую влияет на точность регистрации событий в детекторе.

Таким образом, структурная схема устройства отражает модульный принцип построения системы, где каждый блок выполняет строго определённую функцию, а взаимодействие между ними обеспечивает стабильную работу стенда, точное управление напряжением смещения SiPM и качественное усиление сигнала с минимальными искажениями.

Заключение. Предложен вариант стенда для исследования сцинтилляционных кристаллов при взаимодействии с кремниевым фотоумножителем, классическим вакуумным ФЭУ. Выполнен анализ схемы электрической структурной.

Список литературы

1. Growth and Evaluation of Improved CsI:TI and NaI:TI Scintillators. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2073-4352/12/11/1517>.
2. Study of scintillation properties and performance of CsI(Tl) detectors over time – [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://tinyurl.com/2xxbpb4>.
3. CN 106597569 A – Multifunctional scintillation crystal testing platform. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/CN106597569A/en>.

UDC 621.3.049.77–048.24:537.2

SCINTILLATION CRYSTALS RESEARCH STAND

Navumchyk P.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Sobchuk N.S. – Senior Lecturer of the Department of Electronic Engineering and Technology

Annotation. Since scintillation crystals are more relevant than ever in radiometry and dosimetry, we offer a scintillation crystal research setup with USB-C connectivity to a personal computer, adjustable setup parameters, and signal acquisition via an external analog-to-digital converter.

Keywords: scintillator, SiPM, photomultiplier, microcontroller, ionizing radiation

ИЗМЕРИТЕЛЬ ТОКА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА С ЦИФРОВЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ

Раткевич И.И.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Собчук Н.С. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. Разработан цифровой измеритель постоянного и переменного тока на основе эффекта Холла, обеспечивающий измерение с гальванической развязкой и передачу данных по цифровому интерфейсу. В работе рассмотрен принцип действия устройства, структурная и схемотехническая реализация, а также конструктивно-технологические особенности электронного модуля. Обоснован выбор элементной базы, материалов печатной платы и типа монтажа. Разработанное устройство ориентировано на применение в составе систем мониторинга и управления электроэнергетическими процессами.

Ключевые слова: измеритель тока, эффект холла, измерение постоянного и переменного тока, цифровой интерфейс, печатная плата, гальваническая развязка, микроконтроллер

Введение. Измерение электрического тока является одной из ключевых задач в системах управления, защиты и мониторинга электрических цепей. Точность и надёжность измерений напрямую влияют на корректность работы силовой электроники, источников питания и автоматизированных систем управления. Традиционные методы измерения тока, такие как шунтовые и трансформаторные, обладают рядом ограничений, связанных с отсутствием гальванической развязки либо невозможностью измерения постоянного тока.

Перспективным направлением является применение датчиков тока на основе эффекта Холла, обеспечивающих бесконтактное измерение как постоянного, так и переменного тока с гальванической развязкой между измерительной и силовой цепями. Использование цифровых интерфейсов передачи данных позволяет интегрировать такие измерители в современные микропроцессорные системы без дополнительной аналоговой обработки сигналов.

В данной статье автором показано, конструкция цифрового измерителя тока на основе эффекта Холла, обладающего компактной конструкцией, технологичностью изготовления и возможностью применения в составе радиоэлектронных средств различного назначения.

Основная часть. Принцип работы измерителя основан на использовании эффекта Холла, заключающегося в возникновении поперечного электрического напряжения в полупроводниковом элементе при воздействии магнитного поля, создаваемого током в проводнике. Измеряемый ток пропускается через токоведущий проводник, расположенный вблизи чувствительного элемента датчика Холла, при этом прямое электрическое соединение с измеряемой цепью отсутствует.

Магнитное поле, пропорциональное величине тока, преобразуется датчиком Холла в электрический сигнал, который далее усиливается, оцифровывается и передаётся в цифровом виде во внешнюю систему управления или мониторинга. Такой подход обеспечивает гальваническую развязку, повышает электрическую безопасность и устойчивость устройства к помехам.

Устройство включает следующие основные функциональные блоки:

- датчик тока на основе эффекта Холла;
- блок усилителей и фильтров;
- аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- микроконтроллер с цифровым интерфейсом;
- интерфейс подключения к внешнему управляющему устройству.

Аналоговый сигнал с датчика Холла поступает на вход блок усилителей и фильтров, где выполняется его усиление и фильтрация, после чего сигнал поступает в АЦП для преобразования в цифровую форму и после поступает вход микроконтроллера, где формирование выходных данных. Передача измеренной информации осуществляется по цифровому интерфейсу во внешнее управляющее устройство, например, микроконтроллерную систему или персональный компьютер.

На рисунке 1 представлена структурная схема измерителя тока.

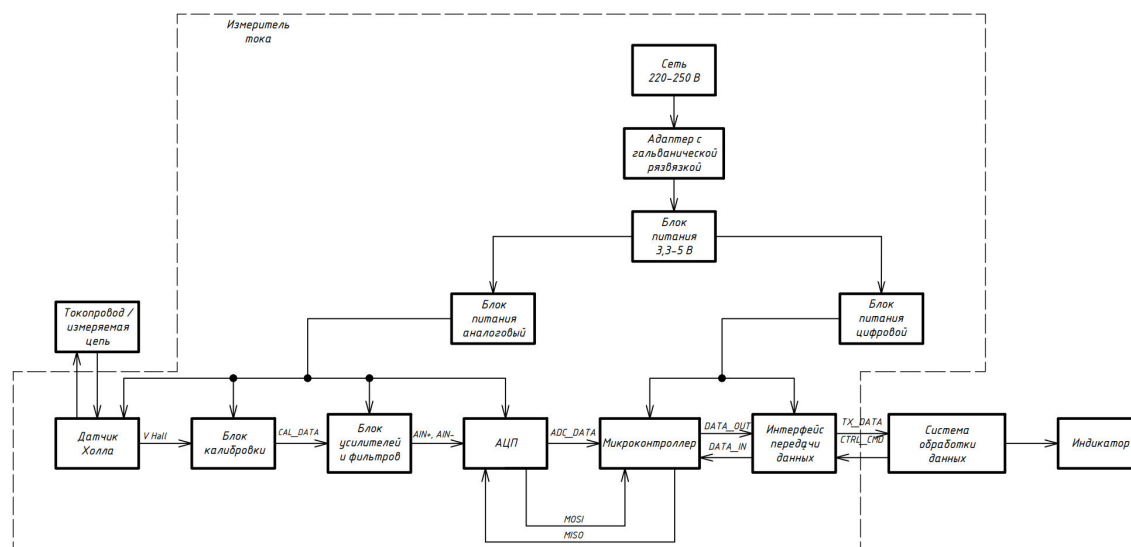
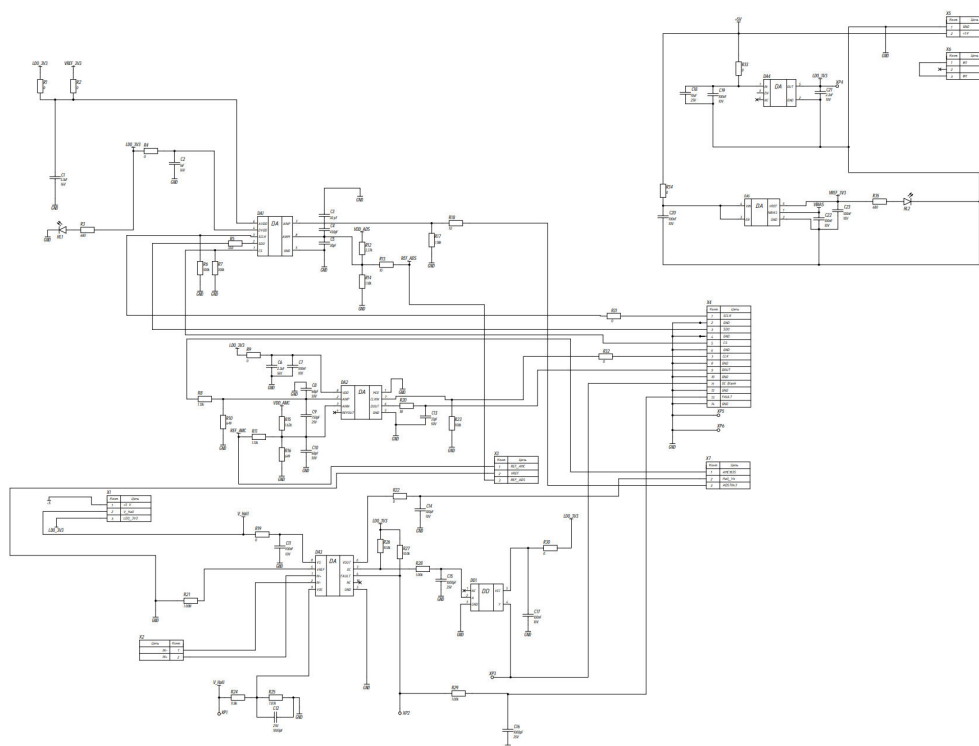


Рисунок 1 – Структурная схема измерителя тока

Схема электрическая принципиальная представлена на рисунке 2.



Раздельное питание аналоговой и цифровой частей обеспечивает снижение уровня шумов и повышение точности измерений. Для подключения внешних устройств предусмотрены разъёмы питания и интерфейса передачи данных.

Электронный модуль выполнен на печатной плате из стеклотекстолита FR-4 с применением поверхностного монтажа SMD-компонентов, что обеспечивает компактность конструкции и высокую технологичность изготовления. Конструкция платы предусматривает минимизацию паразитных наводок и разделение аналоговых и цифровых цепей.

Корпус устройства обеспечивает механическую защиту и устойчивость к внешним воздействиям, а также удобство монтажа в составе радиоэлектронных средств.

Заключение. В результате работы разработан измеритель тока на основе эффекта Холла с цифровым интерфейсом, обеспечивающий измерение тока с гальванической развязкой и цифровой передачей данных. Предложенные схемотехнические и конструктивные решения позволяют использовать устройство в системах мониторинга и управления электрическими параметрами. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения эффекта Холла для построения компактных и технологичных измерительных модулей.

Список литературы

1. Волков, А. В. Датчики физических величин: принципы работы и применение / А. В. Волков – М.: Радио и связь, 2018. – 304 с.
2. Allegro Microsystems. «Hall-Effect Sensor ICs: Technical Guide and Design Considerations.» – Worcester, MA, 2021. – 35 p.
3. Infineon Technologies. «Principles of Hall Effect Current Sensors.» – Application Note AN_2018-09, 2019. – 22 p.
4. Texas Instruments. «Hall-Effect Current Sensor Design Considerations.» – Application Report SLYY198, 2020. – 18 p.
5. Михайлов, А. А. Микроконтроллерные системы измерения и управления / А. А. Михайлов – СПб.: БХВ-Петербург, 2020. – 384 с.

UDC 621.311.25:621.039

HALL EFFECT CURRENT METER WITH DIGITAL INTERFACE

Ratkevich I.I.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus
Sobchuk N. S. – Senior lecturer at the ETT Department*

Annotation. A digital Hall effect-based DC and AC current meter has been developed, providing galvanically isolated measurement and data transmission via a digital interface. The paper considers the principle of operation of the device, the structural and circuitry implementation, as well as the design and technological features of the electronic module. The choice of the element base, printed circuit board materials and mounting type is justified. The developed device is intended for use as part of monitoring and control systems for electric power processes.

Keywords: current meter, hall effect, DC and AC current measurement, digital interface, printed circuit board, galvanic isolation, microcontroller

ВЛИЯНИЕ ВИДА ВОЗБУЖДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В ОБЪЁМЕ РЕЗОНАТОРА СВЧ-ПЛАЗМАТРОНА

Шавня Д.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Мадвейко С.И. – к.т.н, доцент, заведующий кафедрой ЭТТ

Аннотация. В данной работе было проведено моделирование влияния вида возбуждающего устройства на распределение электромагнитной энергии в объёме резонатора СВЧ-плазматрона. Работа проводилась в программной среде MatLab. Было проведено сравнение возбуждающего зонда и щелевого возбуждения. По результатам работы было выявлено, что щелевое возбуждение является более эффективным способом возбуждения, позволяя добиться наиболее плотного и равномерного распределения электромагнитной энергии внутри резонатора. Прибавка в равномерности распределения в 2 раза больше, чем при зондовом возбуждении.

Ключевые слова. резонатор, электромагнитное поле, распределение энергии, щелевое возбуждение, равномерность поля, возбуждающее устройство, СВЧ-плазматрон, электромагнитная энергия, неоднородность поля.

Введение. Сверхвысокочастотные (СВЧ) плазматроны являются ключевыми элементами в современных технологиях, начиная от ускорителей заряженных частиц и заканчивая системами плазменной обработки материалов. В СВЧ плазматронах резонаторы используются для создания и поддержания плазмы, концентрируя электромагнитную энергию в ограниченном объеме. Эффективность такого устройства напрямую зависит от конфигурации электромагнитного поля внутри резонатора. В свою очередь, конфигурация поля зависит от вида возбуждающего устройства.

Выбор вида и места расположения возбуждающего устройства определяет, какие именно типы колебаний (моды) будут возбуждены в резонаторе, и насколько эффективно энергия генератора будет передана в объем. Неоптимальный выбор возбудителя может привести не только к снижению коэффициента полезного действия, но и к возникновению нежелательных паразитных мод, искажающих картину поля и ухудшающих однородность плазмы. В связи с этим, исследование влияния параметров возбуждающего устройства на распределение электромагнитной энергии является актуальной задачей, позволяющей оптимизировать работу СВЧ-плазматрона.

Основная часть. В качестве резонатора мы будем использовать камеру с размерами ширина a – 24 см, высота b – 34 см, длина L – 42 см. Внутри камеры установлена кварцевая труба с радиусом 8 см для установки в неё подложкодержателя с пластинами. Частота – 2,45 ГГц.

Для моделирования мы будем использовать программную среду MatLab [1]. В качестве критериев для сравнения возбуждающих устройств мы будем использовать равномерность распределения электромагнитного поля в области расположения подложкодержателя, а также максимальную напряженность поля, достигаемую в рабочем объеме.

В качестве аналитических формул для математической модели мы используем уравнения Максвелла и Гельмгольца [2]. По этим формулам было высчитано, что мода TE_{122} лучше всего подходит для нашей установки.

При щелевом возбуждении щель находится на верхней стороне резонатора. На рисунке 1 представлено 3D изображение распределения энергии внутри резонатора. На рисунке 2 представлено 3D изображение распределения внутри кварцевой трубы.

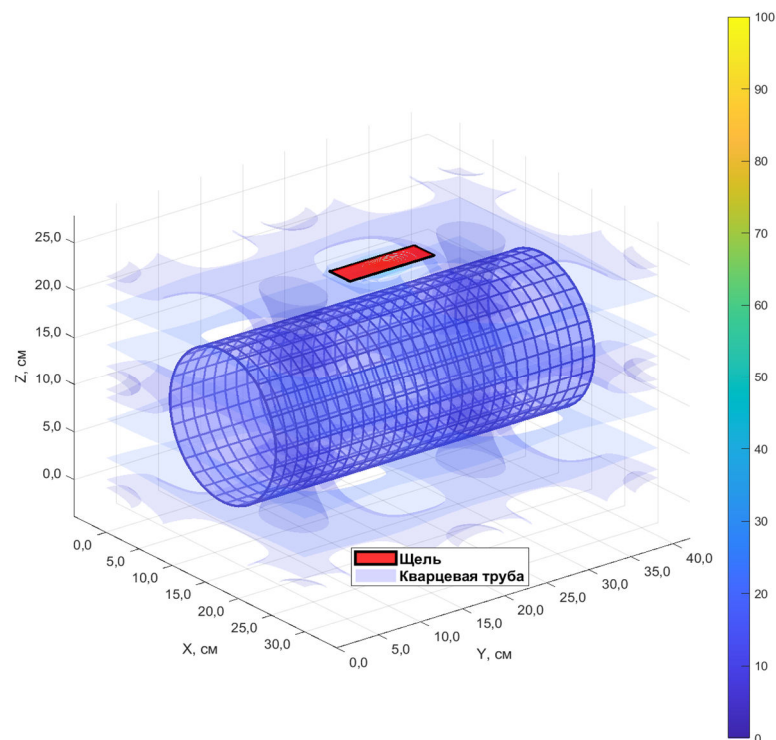


Рисунок 1 – 3D изображение распределения энергии в объёме резонатора при щелевом возбуждении

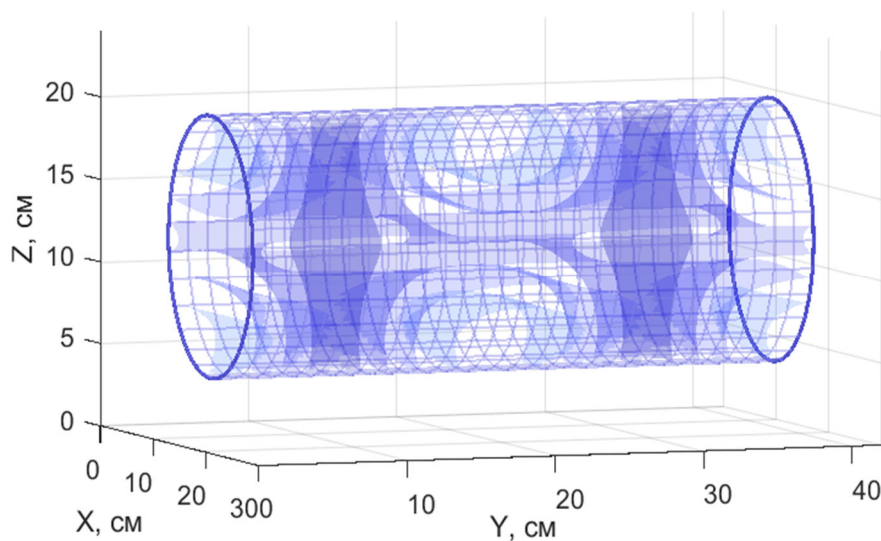


Рисунок 2 – 3D изображении распределения энергии в объёме кварцевой трубы

На рисунке 1 видно, что при щелевом возбуждении основная локальная энергия находится у самой щели, энергия сосредоточена преимущественно в кварцевой трубе, но также частично находится за её пределами. На рисунке 2 видны две области с минимальной энергией при $y = 10$ и $y = 30$, а также три области с максимумами на торцах трубы и в её центре.

На рисунке 3 изображён график распределения плотности энергии вдоль длины трубы.

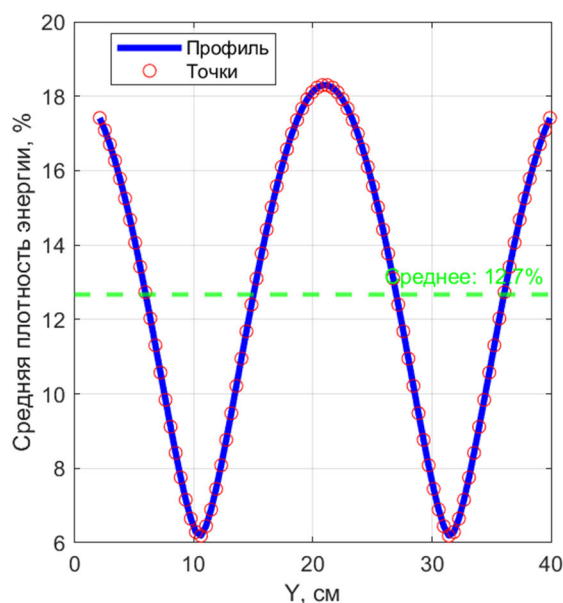


Рисунок 3 – график распределения плотности энергии вдоль длины трубы при щелевом возбуждении

Исходя из данных графика на рисунке 3 можно сказать, что при щелевом возбуждении происходит трёхвершинное распределение, что является следствием нахождения областей с пониженной и повышенной концентрацией энергии, соответствующих узлам и пучностям моды TE_{122} . Несмотря на близость средней и медианой плотности энергии (12,7% и 12,2% соответственно), говорящих о возможной высокой равномерности распределения, коэффициент равномерности составляет 0,516. Это указывает на наличие в объёме трубы как областей с высокой локальной концентрацией энергии (до 20%), так и областей со значительно более низкими значениями (около 0%), что обусловлено интерференционной структурой моды TE_{122} .

При зондовом возбуждении зонд находится на верхней стороне резонатора. На рисунке 4 представлено 3D изображение распределения энергии внутри резонатора. На рисунке 5 представлено 3D изображение распределения внутри кварцевой трубы.

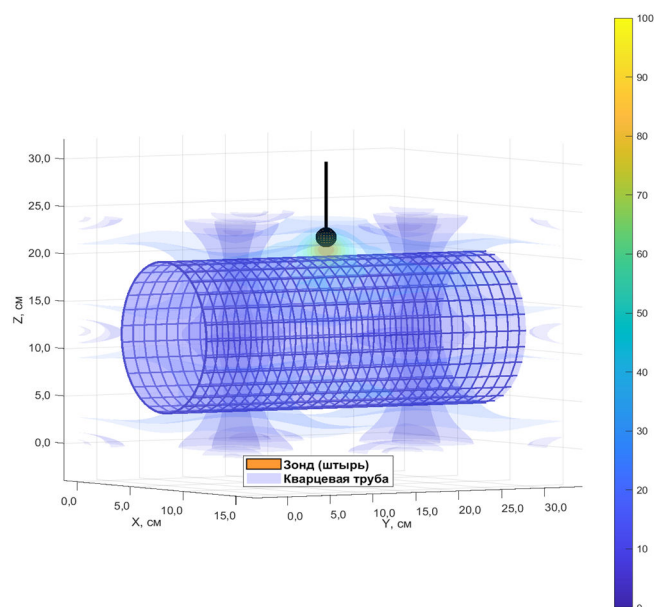


Рисунок 4 – 3D изображение распределения энергии в объёме резонатора при зондовом возбуждении

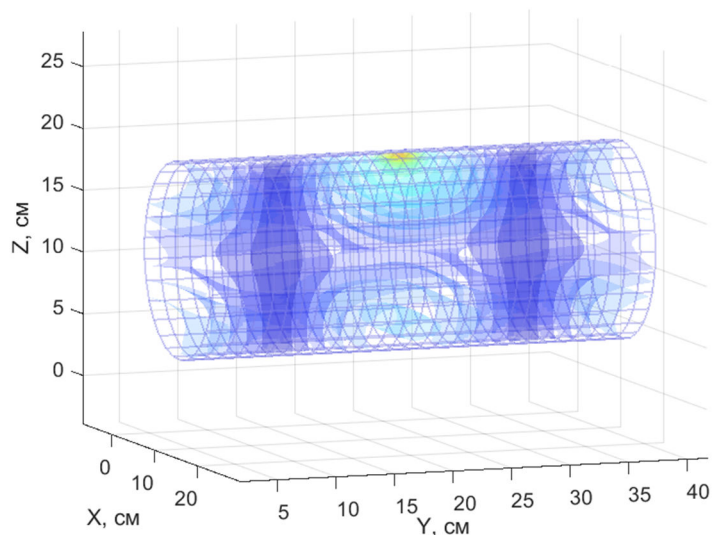


Рисунок 5 – 3D изображении распределения энергии в объёме кварцевой трубы

На рисунке 4 видно, что при зондовом возбуждении основная локальная энергия находится у зонда, но часть этой энергии попадает в трубу, что видно на рисунке 5. Так же в трубе всё также присутствует две области с минимальной энергией и три максимума. На рисунке 6 представлен график распределения плотности энергии вдоль длины трубы при зондовом возбуждении

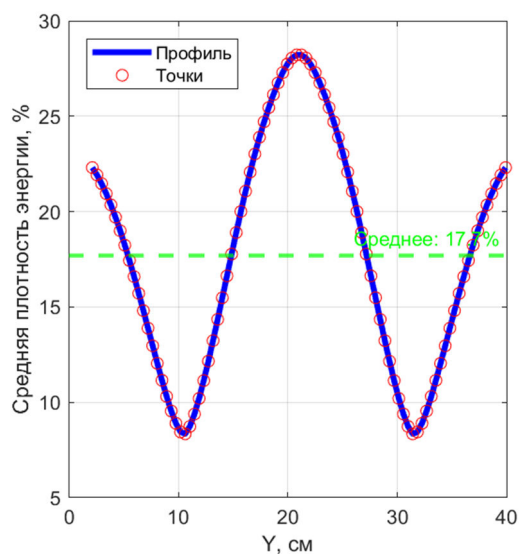


Рисунок 6 – график распределения плотности энергии вдоль длины трубы при зондовом возбуждении

По графику на рисунке 6 видно, что общий уровень средней плотности энергии увеличился, но из-за наличия области с повышенной энергией в центре равномерность распределения значительно упала до 0,216. При изменении положения зонда по оси Z равномерность может повысится, но тогда упадёт и значение энергии.

Заключение. В ходе моделирования установлено, что геометрия возбуждающего устройства влияет на равномерность распределения и плотность энергии в резонаторе СВЧ-плазматрона. Щелевое возбуждение обеспечивает наилучшее согласование с собственной модой TE_{122} , обеспечивая равномерность распределения энергии за счёт 2 зон с минимальной плотностью энергии и 3 зон с максимальной плотностью. Коэффициент равномерности распределения энергии составляет 0,516, что в 2,4 раза выше, чем при зондовом возбуждении (0,216). Зондовое возбуждение приводит к сильной локализации поля вблизи возбудителя и нарушению структуры моды, что снижает однородность обработки подложек.

Таким образом, для задач плазменной обработки, требующих высокой однородности поля, щелевой тип возбуждения является предпочтительным, позволяя увеличить эффективный объем плазмы и стабильность процесса.

Список литературы

1. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – 2-е эл. изд. - Саратов: Профобразование, 2019. – 768 с.: ил.
2. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.: ил.

UDC 621.7-4

**INFLUENCE OF THE EXCITATION DEVICE TYPE ON THE
ELECTROMAGNETIC ENERGY DISTRIBUTION IN THE VOLUME OF A
MICROWAVE PLASMATRON RESONATOR**

Shavnya D.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Madveiko S.I. – Cand. of Sci., associate professor, head of the department of ETT

Annotation. The modeling of the influence of the excitation device type on the electromagnetic energy distribution in the volume of a microwave plasmotron resonator was performed. The work was carried out in the MatLab software environment. A comparison between an excitation probe and slot excitation was conducted. It was revealed that slot excitation is a more effective method, allowing to achieve the most dense and uniform distribution of electromagnetic energy inside the resonator. The gain in distribution uniformity is 2 times higher than that of probe excitation.

Keywords: resonator, electromagnetic field, energy distribution, slot excitation, field uniformity, excitation device, microwave plasmatron, electromagnetic energy, field non-uniformity.

УДК 621.3

АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ КАЛМАНА ДЛЯ ОЧИСТКИ СИГНАЛА ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ В УСЛОВИЯХ ВИБРАЦИЙ ЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ахметзянов Г.Д.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Аваков С.М.— д-р техн. наук, профессор кафедры ЭТТ

Аннотация. Разработан метод фильтрации и отсеивания шумов и паразитных сигналов, рассмотрены стандартный и предиктивный методы фильтрации Калмана, вейвлет-преобразования, их преимущества перед традиционными методами фильтрации, а также возможности их использования в контексте фотолитографического оборудования

Ключевые слова. фильтрация Калмана, отсеивание шума, сглаживатель, вейвлет-преобразования, фотолитография

Введение. В современном литографическом оборудовании, таком как сканеры и степперы, предъявляются экстремальные требования к точности позиционирования, достигающей единиц нанометров. Фотоэлектронные датчики, включая лазерные интерферометры и емкостные датчики уровня, являются ключевыми элементами систем измерения положения стола и контроля фокусировки. Однако их сигналы подвержены интенсивному воздействию вибраций, возникающих из-за работы сервоприводов, клиновых редукторов, пьезодвигателей, газостатических направляющих, внешних фундаментных возмущений и собственных резонансных мод конструкции. Традиционные методы фильтрации, такие как фильтры нижних частот или скользящее среднее, в этих условиях либо вносят недопустимые фазовые задержки, либо недостаточно эффективны из-за нестационарного характера помех. В связи с этим применение алгоритма фильтрации Калмана становится необходимым инструментом для обеспечения требуемой точности измерений.

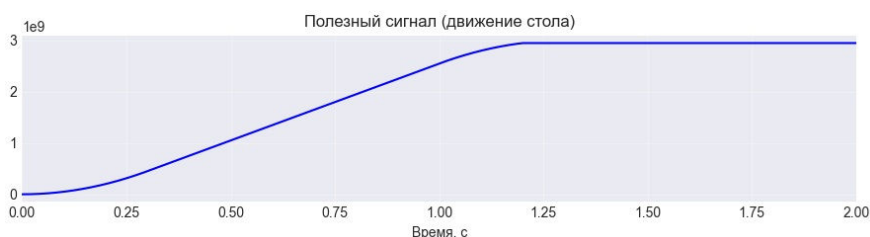


Рисунок 1 — Модель движения стола; координата x обозначает время работы стола в с, координата y — перемещение стола в мм

Задача. В идеальной системе позиционирования существует модель движения стола, представленная на рисунке 1. Однако при работе реального фотолитографического оборудования наблюдаются помехи, подобные тем, что представлены на рисунке 2. Чтобы устранить или, по крайней мере, минимизировать влияние вибраций и внешних шумов, необходимо разработать фильтр, создающий математическую модель, компенсирующую посторонние нежелательные эффекты.

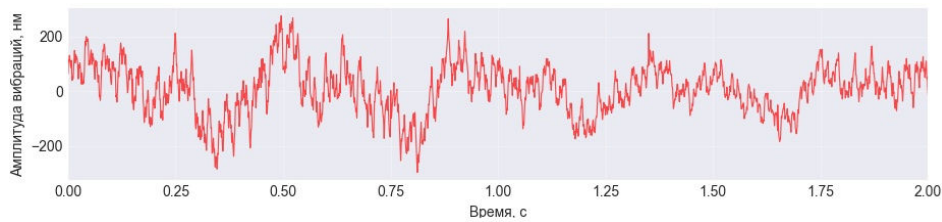


Рисунок 2 — Моделируемые вибрации (гармоники + импульсы)

Основная часть. Практическая реализация начинается с идентификации системы: необходимо снять спектр вибраций с помощью акселерометров, выделить доминирующие частоты и построить модели формирующих фильтров. Настройка ковариаций шума процесса и измерений должна учитывать физические ограничения динамики стола и реальный уровень шумов, полученный при неподвижном оборудовании. Критически важным аспектом является учет временных задержек, вносимых аналоговой частью датчиков и аналого-цифровыми преобразователями. Для компенсации этих задержек применяются фильтры Калмана со смещенной моделью или с функцией предсказания, что необходимо для предотвращения потери устойчивости на резонансных частотах сервоконтура [2].

Основой для синтеза фильтра служит модель динамики измеряемого параметра и модель измерительного тракта. В литографии наиболее адекватной является модель постоянной скорости или постоянного ускорения, где вектор состояния включает положение, скорость и, при необходимости, ускорение. Для литографического оборудования адекватной является модель постоянной скорости или постоянного ускорения (*модель Сигала*):

$$x_k = Fx_{k-1} + w_k, \quad w_k \sim N(0, Q), \quad (1)$$

где вектор состояния обычно включает:

p — положение (измеряемая величина);

v — скорость;

a — ускорение (опционально, для учета рывков при движении стола).

Матрица перехода F (для модели с постоянной скоростью, интервал времени Δt):

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Процесс измерения описывается *уравнением наблюдения*, в котором шум измерения в условиях вибраций не является белым, а содержит коррелированные составляющие на частотах от десятков до сотен герц. Фотоэлектронные датчики (например, лазерные интерферометры или емкостные датчики) выдают сигнал, искаженный вибрациями. Уравнение измерения:

$$z_k = Hx_k + v_k, \quad (3)$$

где $H = [1, 0]$ (измеряем только положение),

v_k — шум измерения. В условиях вибраций v_k не является белым шумом; он содержит коррелированные компоненты на частотах вибраций (десятки-сотни Гц).

При создании фильтра Калмана используется два вида шумов: Q (шум процесса) — Определяется физикой движения стола (максимальное ускорение, рывок); обычно задается как малая величина, соответствующая неопределенности модели движения. R (*шум измерения*) — Оценивается по статическим измерениям (стол неподвижен), а также анализ спектра вибраций; для адаптивных версий задается начальное приближение [1]. Стандартный фильтр Калмана предполагает априорно известные ковариации шумов (Q и R), однако вибрационный фон в оборудовании существенно меняется в зависимости от фазы цикла

экспонирования – разгона стола, стабилизации, самой экспозиции и торможения. Для решения этой проблемы применяются адаптивные модификации, в частности адаптивный фильтр Калмана, который оценивает ковариацию шума (Q и R) измерения в реальном времени на основе анализа инновационной последовательности (невязки). Это позволяет фильтру динамически подстраиваться под изменение амплитуды вибраций. Адаптивный фильтр Калмана (АКФ) используется для оценки ковариации шума измерения R в реальном времени. Наиболее эффективен метод на основе инновационной последовательности (невязки):

$$\check{z}_k = z_k - H^x_{k|k-1}. \quad (4)$$

Эмпирическая ковариация инновации вычисляется как:

$$\hat{S}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k \check{z}_i \check{z}_i^T. \quad (5)$$

Теоретическая ковариация инновации:

$$S_k = H P_{k|k-1} H^T + R_k. \quad (6)$$

Более эффективным подходом к подавлению узкополосных вибраций является использование формирующих фильтров, реализуемое через расширение вектора состояния. В этой модели вибрации описываются собственными динамическими уравнениями, а расширенный вектор состояния объединяет физические переменные движения и компоненты вибрационного воздействия.

Модель вибрации (например, для одной гармоник) описывается формирующим фильтром:

$$d_{k+1} = A_d d_k + w_{d,k}. \quad (7)$$

Расширенный вектор состояния:

$$x_k^{aug} = \begin{bmatrix} x_{physics} \\ d_{vibration} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Такой подход позволяет фильтру Калмана не просто сглаживать зашумленный сигнал, а вычитать из измерений оцененную составляющую вибрации, выделяя полезный сигнал перемещения стола практически без фазовых искажений. Дополнительная сложность возникает в замкнутых системах управления, где датчики работают в контуре активной виброизоляции и сервоприводов. Здесь в уравнения состояния вводится управляющее воздействие, а при корреляции шумов процесса и измерений применяются специализированные модификации фильтра, например, с коррелированными шумами.

Для сверхточных применений, таких как иммерсионная или EUV-литография, часто используются гибридные схемы. Сочетание вейвлет-преобразования с фильтром Калмана позволяет эффективно разделять нестационарные ударные воздействия от полезного сигнала и последующей фильтрации каждого уровня декомпозиции. Для задач пост-обработки, например при калибровке датчиков или анализе качества экспозиции, применяется сглаживатель Калмана, который обрабатывает данные не только в прямом, но и в обратном времени, обеспечивая нулевую фазовую задержку.

Исходя из рисунка 3, видно, что гибридная фильтрация (вейвлет + Калман) наиболее эффективна и приближена к полезному сигналу.

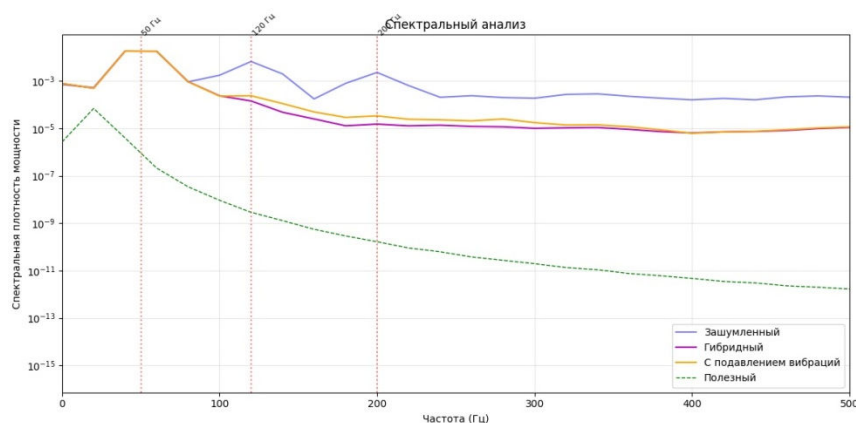


Рисунок 3 — Спектральный анализ различных методов фильтрации

По сравнению с классической фильтрацией, калмановский подход обеспечивает отсутствие фазового набега в полосе пропускания полезного сигнала, что критически важно для синхронизации движения стола и ретикла. Кроме того, фильтр предоставляет оценку ненаблюдаемых переменных, таких как скорость и ускорение, с существенно меньшим уровнем шума, чем при численном дифференцировании, что позволяет улучшить работу предиктивных контроллеров. Адаптивность алгоритмов обеспечивает стабильность работы в переходных режимах разгона и торможения, где статические фильтры становятся неэффективными.

Закключение. Таким образом, применение расширенных и адаптивных фильтров Калмана с формирующими фильтрами для учета цветного шума вибраций является оптимальным решением для обеспечения нанометровой точности совмещения и фокусировки в современном литографическом оборудовании.

Список литературы

1. Теория фильтрации зашумленных сигналов / Балакришнан А.В. // Адыгейский государственный университет – 2014, Майкоп, Адыгея
2. Метод фильтрации шумов в сигнале гироскопического датчика на основе адаптивного альфа-бета-фильтра Калмана / Волков Д.М., Савельев А.И. // Вестник Южно-Уральского университета. Серия: Математика. Механика. Физика – 2024, Том 16, № 4, стр. 16–23.
3. Vibration Sensing Demodulation Method Based on Unscented Kalman Filter / Fan, R., Chu, F., & Bian, Z. // Journal of Shanghai University of Electric Power – 2024, Vol. 40, No. 6, pp. 564–570.

UDC 621.3

A KALMAN FILTERING ALGORITHM FOR CLEANING PHOTOELECTRONIC SENSORS SIGNAL UNDER VIBRATIONS OF LITHOGRAPHIC EQUIPMENT

G.D. Akhmetzyanov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

S.M. Avakov – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Electronic and TFT

Annotation. Methods for filtering and eliminating noise and spurious signals, gradient and predictive Kalman filtering standards, wavelet transforms, their advantages over filtering methods, and the potential for their use in 10x photolithographic equipment are developed.

Keywords: Kalman filtering, noise elimination, smoother, wavelet transforms, photolithography

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ТРАВЛЕНИЯ КВАРЦА ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ УГЛА НАКЛОНА ИОННОГО ПУЧКА

Ходяков И.В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Трапашко Г.А. – к. т. н., доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. В работе исследована зависимость скорости ионно-лучевого травления кварцевой подложки от угла падения ионного пучка при фиксированных параметрах обработки. Эксперимент проводился с использованием ионного пучка с аргонном в качестве рабочего газа, энергией 1000 эВ и шириной 8 мм. На поверхности образца сформированы локальные области травления при углах падения в диапазоне от 0° до 40° при постоянном времени воздействия 300 с для каждой точки. Установлено, что с увеличением угла наклона ионного пучка наблюдается рост глубины травления, достигающий двукратного увеличения по сравнению с нормальным падением. Результаты работы могут быть использованы при оптимизации процессов ионно-лучевой полировки оптических элементов.

Ключевые слова. ионно-лучевое травление, ионно-лучевая полировка, кварц, угол падения, скорость травления, коэффициент распыления, оптические элементы, обработка поверхности

Введение. Корректировка формы и качества поверхности оптических элементов, является одной из ключевых задач прецизионной оптики и приборостроения. Повышение требований к точности оптических систем, применяемых в лазерной технике, микроэлектронике и сенсорных устройствах, обуславливает необходимость получения поверхностей с нанометровой шероховатостью и минимальными дефектами. Традиционные методы механической обработки, такие как шлифование и полирование, не всегда обеспечивают требуемую точность и могут приводить к появлению микродефектов и повреждений поверхностного слоя [1]. В связи с этим всё более широкое применение находят методы ионно-лучевой обработки. Данные методы обеспечивают высокую степень гладкости поверхности, вплоть до субнанометровых значений шероховатости, и эффективно устраняют дефекты, возникающие после традиционной обработки [1].

Физическая основа ионно-лучевой полировки связана с процессами взаимодействия ускоренных ионов с атомами твёрдого тела. При попадании иона в материал происходит передача энергии атомам мишени, что приводит к каскаду столкновений и выбиванию атомов с поверхности. Практическая значимость ионно-лучевой полировки проявляется при обработке кварцевых подложек и оптических элементов, где требуется высокая точность формы и минимальные поверхностные дефекты. Однако в процессе обработки могут возникать нежелательные эффекты, такие как перераспыление материала, образование дефектов и изменение структуры поверхности, что требует детального исследования закономерностей процесса [2].

Особое значение для процессов ионно-лучевой обработки имеет угол падения ионного пучка. Известно, что коэффициент распыления и скорость травления существенно зависят от этого параметра: при наклонном падении ионов увеличивается вероятность передачи импульса поверхностным атомам, что приводит к росту скорости удаления материала [3].

Дополнительные особенности процесса связаны с типом используемых ионов. При использовании молекулярных ионов наблюдается их распад на атомы при взаимодействии с поверхностью, что приводит к изменению распределения энергии и глубины проникновения в материал. Это, в свою очередь, влияет на характер формирования дефектов и эффективность распыления [4].

Анализ современных исследований показывает, что процессы ионно-лучевого травления и полировки определяются сложным взаимодействием параметров пучка (энергии, угла падения, состава ионов) и свойств материала. Несмотря на значительное количество работ, остаётся актуальной задача установления закономерностей изменения скорости травления в зависимости от угла наклона ионного пучка, особенно для кварцевых материалов, широко используемых в оптических системах.

Целью данной работы является исследование закономерностей изменения скорости ионно-лучевого травления кварца при варьировании угла наклона ионного пучка, а также

анализ влияния данного параметра на качество поверхности при корректировке формы линз методом ионно-лучевой полировки.

Основная часть. Исследование зависимости скорости ионно-лучевого травления от угла падения ионов проводилось на кварцевых подложках с использованием метода ионно-лучевой обработки.

Ионный пучок формировался с использованием аргона в качестве рабочего газа. Обработка осуществлялась с использованием ионного источника, формирующего пучок с энергией ионов 1000 эВ. Ширина ионного пучка составляла 8 мм, что обеспечивало локализованное воздействие на поверхность образца и формирование отдельных зон травления. Время воздействия ионного пучка составляла 300 с в каждой точке.

Для исследования угловой зависимости скорости травления на поверхности кварцевой подложки были сформированы локальные области обработки в виде углублений. Формирование данных областей осуществлялось при различных углах падения ионного пучка относительно нормали к поверхности. Угол наклона пучка варьировался в диапазоне от 0° до 40° .

В ходе эксперимента было сформировано девять отдельных углублений, соответствующих различным значениям угла падения (рис. 1). Все остальные параметры обработки, включая энергию ионного пучка и геометрию воздействия, поддерживались постоянными, что обеспечивало возможность корректного сопоставления результатов. Контроль полученных данных происходил на интерферометре.

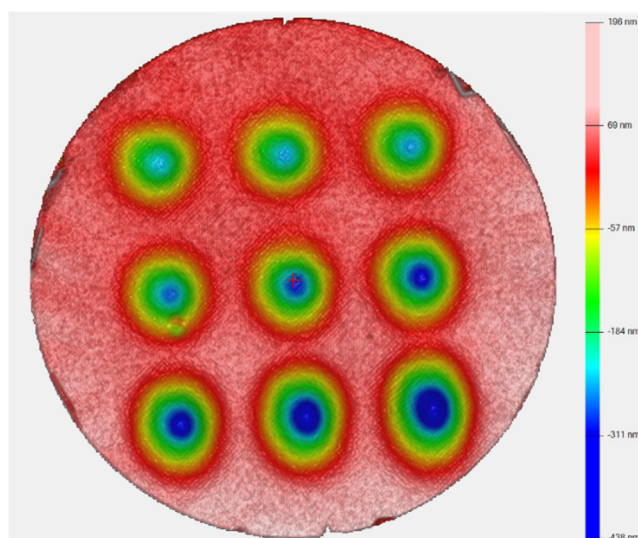


Рисунок 1 – Интерферограмма поверхности кварцевой подложки с локальными областями обработки в виде углублений при различных углах падения ионного пучка

После завершения обработки проводилось измерение глубины сформированных углублений. Полученные значения использовались для оценки интенсивности удаления материала при различных углах падения ионов. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1 – результаты измерения глубины травления кварцевой подложки при различных углах падения ионного пучка

Угол наклона пучка, град.	Глубина травления, нм
0	239,27
5	270,10
10	286,29
15	289,01
20	334,19
25	369,33
30	399,21
35	437,09
40	480,97

С увеличением угла наклона пучка наблюдается устойчивый рост глубины сформированных углублений. В исследуемом диапазоне углов глубина травления увеличивается приблизительно в два раза. Полученная зависимость свидетельствует о повышении эффективности ионного распыления при увеличении угла падения ионов. Это

обусловлено изменением характера передачи энергии в приповерхностном слое. При наклонном падении возрастает вероятность передачи импульса поверхностным атомам, что приводит к увеличению коэффициента распыления. В случае нормального падения часть энергии ионов рассеивается в глубине материала, снижая эффективность удаления вещества.

Закключение. Экспериментально установлено, что с увеличением угла наклона ионного пучка в диапазоне от 0° до 40° наблюдается устойчивый рост скорости травления. Максимальная глубина составляет 480.968 нм, что примерно в два раза превышает значение, полученное при нормальном падении ионов. Это свидетельствует о существенном увеличении эффективности удаления материала при наклонном падении пучка. В исследуемом диапазоне углов реализуется возрастающий участок зависимости скорости травления от угла падения, что согласуется с современными представлениями о механизмах ионно-лучевого травления [1].

Установленные зависимости могут применяться для ограничения угла наклона ионного пучка при обработке линз с большой кривизной поверхности, что позволяет обеспечить требуемую равномерность травления и повысить качество формируемой поверхности.

Список литературы

1. *Ion polishing of fused silica by low-energy ion beams* / N. I. Chkhalo, A. E. Pestov, N. N. Salashchenko [et al.] // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, No. 22. – P. 6191–6198.
2. *Angle-dependent ion beam etching of RuAl thin films for structuring GHz-frequency electronics* / S. Hampel, R. Voigtländer, T. König [et al.] // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2024. – Vol. 35. – Art. 204.
3. *Molecular ion induced surface amorphization of silicon: a comparative study using molecular dynamics simulations* / M. Schmidt, M. Emmert, M. Seibt // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 2017. – Vol. 411. – P. 119–126.
4. *Molecular dynamics simulation of ion beam polishing of silicon surface* / Y. Xiao, H. Wu, J. Li [et al.] // *Applied Surface Science*. – 2021. – Vol. 546. – Art. 149094.

UDC 621.3

ANGLE DEPENDENCE OF ION BEAM ETCHING RATE OF QUARTZ SUBSTRATES FOR OPTICAL SURFACE CORRECTION

Khodiakov I.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Trapashko G.A. – Cand. Of Sci., associate professor, associate professor of the department of ETT

Annotation. This work investigates the dependence of the ion beam etching rate of quartz substrates on the ion incidence angle under fixed processing conditions. The experiment was carried out using an argon ion beam with an energy of 1000 eV and a beam width of 8 mm. Local etching areas were formed on the sample surface at incidence angles ranging from 0° to 40° , with a constant irradiation time of 300 s for each point. It was found that the etching depth increases with increasing ion incidence angle, with the maximum value being approximately twice as high as that at normal incidence. The observed behavior is attributed to the enhanced energy transfer to near-surface atoms at oblique ion incidence, leading to an increase in sputtering efficiency. The results confirm that the ion incidence angle is a key parameter governing the ion beam etching process. The obtained data can be used for optimization of ion beam polishing processes in optical applications, particularly for limiting the incidence angle during the correction of lenses with high surface curvature.

Keywords: ion beam etching, ion beam polishing, quartz substrate, ion incidence angle, sputtering yield, etching rate, optical elements, surface correction

ВСТРАИВАЕМЫЙ МОДУЛЬ РАСШИРЕНИЯ USB

Логвинов Д.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель: Собчук Н.С. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. Представлена разработка встраиваемого модуля расширения USB для интеграции в мебель офисной, лабораторной и промышленной среды. Цель – обеспечить высокоскоростной обмен данными и гибкое питание. Конструкция выполнена во врезном исполнении с отводом тепла и виброустойчивым креплением. Функционально поддерживаются SuperSpeed до 5 Гбит/с и профили питания 5...9 В. Отмечены технологичность, маршрут сборки и готовность к опытно-промышленной эксплуатации.

Ключевые слова: встраиваемый модуль, врезной модуль, USB-порты, передача данных, зарядное устройство

Введение. Широкое внедрение встраиваемых USB-модулей с поддержкой SuperSpeed и ускоренной зарядки, чувствительных к электромагнитным помехам, нарушению целостности сигнала и электростатическим разрядам, выдвигает задачи обеспечения ЭМС, тепловой устойчивости и периодического функционального контроля на одно из первых мест [1].

В данной статье показано, что ухудшение качества обмена и питания может наступать уже при не критичных воздействиях, что приводит к росту ошибок передачи, ложным срабатываниям защит и скрытым отказам, требующим специальных конструктивно-схемотехнических решений.

Основная часть. Встраиваемый USB-модуль предназначен для интеграции в мебель и офисные рабочие места. Он обеспечивает быстрый доступ к питанию и передаче данных без внешних хабов, совместим с ПК, может работать как концентратор для наращивания числа портов и поддерживает современные профили USB-питания и обмена скоростных данных в средах с повышенными требованиями к надёжности и ЭМС.

Корпус пластмассовый во врезном исполнении с лицевой панелью и винтовой фиксацией. Тепло в блоке распределяется равномерно и соответствует нормам безопасности и требованиям к эффективности, что обеспечивает устойчивое функционирование электронной компонентной баз. Печатная плата многослойная с контролируемым импедансом высокоскоростных пар. Перечисленные технические возможности делают разработанный модуль полноценным и надёжным узлом расширения USB-интерфейса. Он объединяет высокоскоростной цифровой интерфейс, гибкое управление питанием и современные средства защиты. В результате устройство гарантирует одновременно стабильную связь и безопасность при работе с широким спектром периферийных устройств [2].

Блок питания обеспечивает электромагнитную совместимость по входу и стабильность питания последующих узлов. Два независимых понижающих преобразователя 5 В формируют напряжение для питания шин VBUS USB-портов или логических цепей где разделение на два канала снижает токовую нагрузку каждого преобразователя. Наличие отдельного 9-вольтового преобразователя предусмотрено для скоростного питания периферийных устройств. Контроллер данных является центральным логическим блоком, обеспечивающим коммутацию трафика USB. Блоки «Ввод/вывод данных» являются множественными идентичными интерфейсными узлами, обеспечивающими подключение к персональному компьютеру и к внешним периферийным устройствам. Структурная схема устройства указана на рисунке 1.

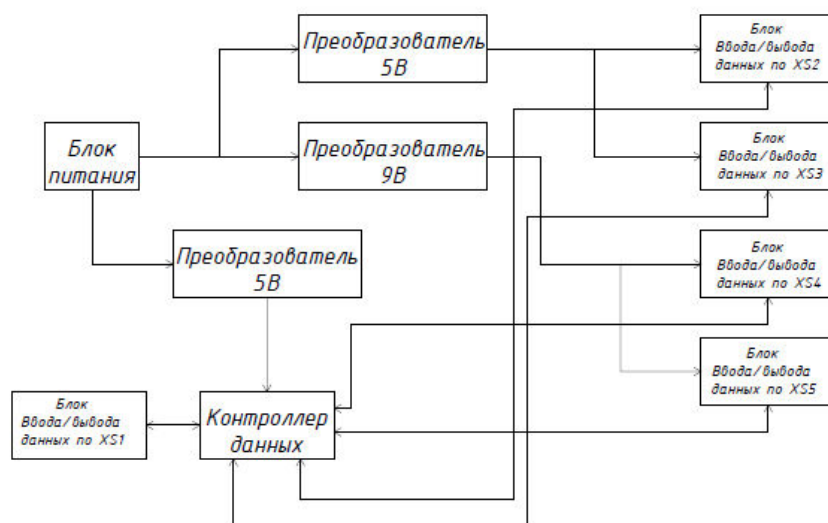


Рисунок 1 – Электрическая структурная схема устройства

Надёжность разработанного USB-модуля оценивалась теоретически методом суммирования параметров компонентов на отказ по модели прогнозирования эксплуатационной безотказности элементов производства стран СНГ. Были учтены климатические и механические факторы эксплуатации. Ключевыми показателями надёжности являются средняя наработка на отказ которая рассчитывается по формуле

$$T_o = \frac{1}{\lambda} \cdot 10^6 \text{ ч.} \quad (1)$$

где T_o – наработка на отказ, ч;

λ – сумма параметров компонентов на отказ.

Следует отметить, что реальная наработка на отказ устройства в значительной степени зависит от условий эксплуатации. Работа при повышенной температуре или влажности, частые механические удары могут несколько снизить долговечность. Тем не менее, даже в жёстких условиях можно ожидать срок бесперебойной службы, измеряемый десятками тысяч часов. Предложенный модуль не содержит движущихся частей и рассчитан на безотказную работу в течение всего жизненного цикла целевого изделия [3].

Заключение. Таким образом, результаты работы демонстрируют целесообразность применения разработанного USB-модуля в различных сферах. Достигнутое сочетание функциональности, надёжности и простоты интеграции делает устройство привлекательным для внедрения в умную мебель, научно-образовательные комплексы и промышленные системы, где растёт спрос на встроенные средства подключения и зарядки USB-устройств. В будущем планируется экспериментальная эксплуатация опытных образцов модуля в реальных условиях и накопление статистических данных, что позволит ещё более точно оценить его надёжность и при необходимости внести дополнительные улучшения. Тем не менее, уже на текущем этапе разработки очевидно, что предложенное решение обладает высоким потенциалом и отвечает актуальным потребностям отрасли.

Список литературы

1. *Universal serial bus 3.0 specification* / Hewlett-Packard Company, Intel Corporation, Microsoft Corporation, NEC Corporation, ST-NXP Wireless, Texas Instruments – 2008. – Pp. 487.
2. USB-IF. USB 3.2 Language Usage Guidelines. – [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.usb.org/sites/default/files/usb_3_2_language_product_and_packaging_guidelines_final.pdf
3. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/25651/1/Borovikov_2010.pdf

UDC 621.3.049.77–048.24:537.2

BUILT-IN USB EXPANSION MODULE

Logvinov D.S.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Supervisor: N.S. Sobchuk – Senior Lecturer of the Department of ETT

Annotation. A development of a built-in USB expansion module for integration into office, laboratory, and industrial furniture is presented. The goal is to provide high-speed data exchange and flexible power supply. The design features a flush-mounted design with heat dissipation and vibration-resistant mounting. Functionally, it supports SuperSpeed up to 5 Gbps and 5-9 V power profiles. The module's manufacturability, assembly flow, and readiness for pilot production are highlighted.

Keywords: Built-in module, flush-mounted module, USB ports, data transfer, charger

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДВУХСЛОЙНОГО ПРОСВЕТЛЯЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ Al_2O_3/MgF_2 НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Макарцов И.О.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Аваков С.М. – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры ЭТТ

Аннотация. В работе исследовано влияние двухслойного просветляющего покрытия Al_2O_3/MgF_2 на шероховатость поверхности оптических деталей. Показано, что нанесение покрытия сопровождается увеличением параметров шероховатости поверхности и среднеквадратического отклонения, причем величина изменения зависит от исходного качества полировки образца. Полученные результаты свидетельствуют о существенной роли исходного состояния поверхности в формировании конечного микрорельефа покрытия Al_2O_3/MgF_2 .

Ключевые слова. двухслойное просветляющее покрытие, оксид алюминия, фторид магния, шероховатость поверхности, микрорельеф, тонкие пленки, оптические детали, интерферометрия, кварцевые свидетели, электронно-лучевое испарение.

Введение. В связи с развитием проектирующих систем для оборудования микроэлектронной промышленности в направлении сокращения длины волны излучения предъявляются все более высокие требования к прецизионной оптике с низким уровнем рассеяния в УФ- и ГУФ-диапазонах. Шероховатость поверхности оптических деталей рассматривается как один из факторов, вызывающих рассеяние света [1]. Для оптических систем, работающих в ГУФ-диапазоне, даже незначительное рассеяние может приводить к снижению контраста изображения и появлению паразитных засветок, что особенно существенно при формировании топологических элементов субмикронного размера.

Материалы Al_2O_3 и MgF_2 применяются для формирования просветляющих покрытий, используемых в прецизионной оптике, в том числе для ультрафиолетового диапазона. Для нанесения данных материалов часто используется метод электронно-лучевого испарения, применяемый для получения многослойных оптических систем. Слой Al_2O_3 обладает более высокой плотностью и подвижностью атомов, может способствовать частичному сглаживанию микрорельефа подложки и снижению исходной шероховатости [2]. В то же время слой MgF_2 , обеспечивающий низкий показатель преломления, при температуре подложки порядка 494 К может формироваться с частично выраженной столбчатой морфологией, что, согласно литературным данным, может приводить к увеличению микронеровностей поверхности и изменению эффективного показателя преломления [3, 4]. По экспериментальным данным может наблюдаться изменение состояния поверхности, влияющее на интерференционные условия, заложенные при проектировании покрытия. Целью работы является исследование изменения микрорельефа поверхности кварцевых деталей после нанесения двухслойного покрытия Al_2O_3/MgF_2 .

Основная часть. В эксперименте были использованы: *sv1* – образец с механически отполированной поверхностью; *sv2* – образец с механически отполированной поверхностью, дополнительно обработанный ионным пучком. Двухслойное просветляющее покрытие нанесено на установке электронно-лучевого испарения при температуре подложки 494 К. Параметры режима напыления были выбраны для достижения приемлемого коэффициента пропускания образцов на уровне 99%.

Для оценки влияния нанесения просветляющего покрытия Al_2O_3/MgF_2 на морфологию поверхности образцов был выполнен интерферометрический и профилометрический контроль образцов (рисунок 1) до и после напыления. Анализ проводился по параметрам:

среднеквадратическое отклонение (RMS), среднее арифметическое отклонение профиля (R_a) и максимальную высоту неровностей профиля (PV) (таблица 1).

В первую очередь рассмотрим изменения параметров поверхности для образца sv2, обладающего прецизионным качеством обработки. У образца sv2 значение RMS увеличилось с 2,06 нм до 3,17 нм. Среднее арифметическое отклонение профиля R_a изменилось с 0,33 нм до 0,37 нм. При этом параметр PV изменился незначительно. Это свидетельствует об отсутствии макродефектов напыления и указывает на то, что изменения происходят преимущественно на уровне микрошероховатости поверхности.

Наблюдаемое увеличение шероховатости может быть связано с особенностями формирования тонкопленочной структуры MgF_2 при вакуумном напылении. При температуре подложки порядка 494 К повышается подвижность атомов, что способствует уплотнению пленки, росту зерен и формированию кристаллитов [3, 4].

Таблица 1 – Измеренные параметры шероховатости поверхности до и после нанесения покрытия для двух образцов

	без покрытия		с покрытием	
свидетель	sv1	sv2	sv1	sv2
RMS , nm	6,37	2,06	9,84	3,17
PV , nm	49,09	59,59	54,15	61,95
R_a , nm	0,43	0,33	0,49	0,37

Согласно модели структурных зон, морфология пленок определяется соотношением T_s/T_m (где T_s – температура подложки, а T_m – температура плавления материала). В области $T_s/T_m \approx 0,3$, согласно модели, наблюдается переход от пористой структуры к более плотной, с формированием зерен [5]. Границы таких зерен формируют дополнительный микрорельеф поверхности, который накладывается на исходную шероховатость подложки, что приводит к увеличению параметров RMS и R_a .

Дополнительным фактором может являться многослойная структура покрытия. Использование материалов Al_2O_3 и MgF_2 с различными термомеханическими свойствами приводит к возникновению внутренних напряжений при охлаждении после напыления. Релаксация этих напряжений может вызывать микродеформации поверхностного слоя и увеличение высокочастотной составляющей микрорельефа [6].

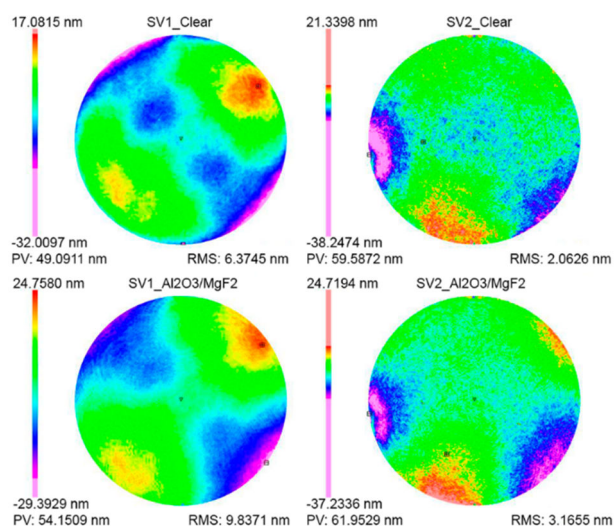


Рисунок 1 – Интерферограммы исследуемых образцов: sv1 – образец с механически отполированной поверхностью; sv2 – образец с механически отполированной поверхностью, дополнительно обработанный ионным пучком

Для оценки корректности полученных результатов было выполнено сравнение экспериментальных данных с литературными значениями шероховатости тонких пленок MgF_2 , сформированных методами физического осаждения при близких температурных условиях (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнение экспериментальных и литературных данных по шероховатости

Параметр	sv2 без покрытия	sv2 с покрытием	Литературные данные [7, 8]
RMS , nm	2,06	3,17	0,5 – 5,0
R_a , nm	0,33	0,37	0,4 – 1,0

Из таблицы 2 следует, что полученные значения параметров шероховатости находятся в диапазоне, сопоставимом с литературными данными [7, 8]. Следует отметить, что величина шероховатости в значительной степени определяется условиями формирования пленки, включая метод осаждения, температуру подложки и энергетические параметры процесса, в связи с чем наблюдается разброс значений. Отмечается, что значение параметра R_a после нанесения покрытия находится на нижней границе характерных значений, что может свидетельствовать о формировании относительно однородного поверхностного слоя.

Дополнительно был проведен сравнительный анализ образцов sv1 и sv2, отличающихся качеством исходной полировки поверхности. Результаты измерений показали, что для образца sv1 значение RMS увеличилось с 6,37 до 9,84 нм, тогда как для образца sv2 – с 2,06 до 3,17 нм. Абсолютный прирост RMS для sv1 составил 3,47 нм, что примерно в три раза превышает аналогичное значение для sv2, равное 1,11 нм. Аналогичная тенденция наблюдается и для параметра R_a : для sv1 он увеличился с 0,43 до 0,49 нм, а для sv2 – с 0,33 до 0,37 нм. Полученные результаты показывают воспроизводимость морфологии подложки. При повышенной исходной шероховатости возрастает неоднородность роста тонкой плёнки. Развитый микрорельеф поверхности создаёт условия для локального затенения и неравномерного осаждения материала, что может приводить к формированию менее однородной структуры покрытия.

Заключение. В ходе работы установлено, что нанесение двухслойного покрытия Al_2O_3/MgF_2 на предварительно подготовленную подложку сопровождается незначительным увеличением шероховатости поверхности, при этом для подложек с более низким качеством исходной полировки наблюдается более выраженный рост RMS и R_a , что указывает на определяющее влияние исходного состояния поверхности на формирование морфологии покрытия. Наблюдаемые изменения связаны с наследованием микрорельефа подложки, особенностями роста слоя MgF_2 , и влиянием внутренних напряжений в многослойной системе. Для оптических систем, работающих в УФ- и ГУФ-диапазонах, шероховатость поверхности является ключевым параметром, поскольку с уменьшением длины волны вклад шероховатости в диффузионное рассеяние возрастает. Даже незначительные микронеровности приводят к снижению контраста изображения и появлению паразитной засветки [9]. Обеспечение низкой исходной шероховатости подложки и высокого качества её предварительной обработки является необходимым условием получения покрытий с требуемыми оптическими характеристиками в ГУФ-диапазоне.

Список литературы:

1. Apostol, B. F. Scattering of the electromagnetic waves from a rough surface // *Journal of Modern Optics*. – 2012. – Vol. 59, No. 18. – P. 1607–1616. – DOI: 10.1080/09500340.2012.729617.
2. Denisov, D. G. Influence of substrate roughness on light scattering of optical coatings / D. G. Denisov, O. F. Prosovsky, Yu. O. Prosovsky // *Proceedings of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*. – 2020. – № 4. – P. 82–90.
3. Gupta, R. Temperature-dependent optical and mechanical properties of MgF_2 thin films / R. Gupta, A. Sharma // *Applied Surface Science*. – 2015. – Vol. 357. – P. 160–166.
4. Zhang, X. Influences of oxygen ion beam on MgF_2 thin films / X. Zhang, Y. Li, H. Wang // *Coatings*. – 2019. – Vol. 9, № 12. – P. 834. – DOI: 10.3390/coatings9120834.
5. Thornton J. A. Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings / J. A. Thornton // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1974. – Vol. 11, No. 4. – P. 666–670. DOI: 10.1116/1.1312732.
6. Abadias G., et al. Review Article: Stress in thin films and coatings: Current status, challenges, and prospects // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 2018. – Vol. 36, No. 2. – Art. 020801. – DOI: 10.1116/1.5011790.
7. Ristau D., Günster S., Bosch S., et al. Ultraviolet optical and microstructural properties of MgF_2 and LaF_3 coatings deposited by ion-beam sputtering and boat and electron-beam evaporation // *Applied Optics*. – 2002. – Vol. 41, No. 16. – P. 3196–3204. – DOI: 10.1364/AO.41.003196.

8.Reuna J., et al. Influence of ex-situ annealing on the properties of MgF₂ thin films deposited by electron beam evaporation // *Optical Materials*. – 2019. – Vol. 96. – 109326. – DOI: 10.1016/j.optmat.2019.109326.

9.Stover J. C. Optical scattering: measurement and analysis // *Applied Optics*. – 2014. – Vol. 53, No. 4. – P. A35–A45. – DOI: 10.1364/AO.53.000A35.

UDC 621.3

ANALYSIS OF THE EFFECT OF A TWO-LAYER Al₂O₃/MgF₂ AR COATING ON THE SURFACE ROUGHNESS OF OPTICAL COMPONENTS

I.O. Makartsov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

S.M. Avakov – Dr. of Sci., associate professor, associate professor of the department of ETT

Annotation. This study investigated the effect of a two-layer Al₂O₃/MgF₂ antireflection coating on the surface roughness of optical components. It was shown that coating application is accompanied by an increase in surface roughness parameters and standard deviation, with the magnitude of the change depending on the initial polishing quality of the sample. The results demonstrate the significant role of the initial surface condition in shaping the final microrelief of the Al₂O₃/MgF₂ coating.

Keywords. dual-layer antireflection coating, aluminum oxide, magnesium fluoride, surface roughness, microrelief, thin films, optical components, interferometry, quartz crystals, electron beam evaporation.