

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2025



**МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

21–23 мая 2025 г. (в четырех частях)

Часть 1
г. Томск

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)»

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2025

Материалы
международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2025»

21–23 мая 2025 г., г. Томск

В четырех частях

Часть 1

ТУСУР
В-Спектр
Томск, 2025

УДК 621.37/.39+681.518 (063)

ББК 32.84я431+32.988я431

Н 34

Н 34 Научная сессия ТУСУР–2025: материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2025», Томск, 21–23 мая 2025 г.: в 4 частях. – Томск: ТУСУР (заказчик); В-Спектр (ИП Бочкарева В.М., исполнитель). – Ч. 1. – 336 с.

ISBN 978-5-902958-42-0

ISBN 978-5-902958-43-7 (Ч. 1)

ISBN 978-5-902958-44-4 (Ч. 2)

ISBN 978-5-902958-45-1 (Ч. 3)

ISBN 978-5-902958-46-8 (Ч. 4)

Материалы международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых посвящены различным аспектам разработки, исследования и практического применения радиотехнических, телевизионных и телекоммуникационных систем и устройств, сетей электро- и радиосвязи, вопросам проектирования и технологии радиоэлектронных средств, аудиовизуальной техники, бытовой радиоэлектронной аппаратуры, а также автоматизированных систем управления и проектирования. Рассматриваются проблемы электроники СВЧ- и акустооптоэлектроники, нанофотоники, физической, плазменной, квантовой, промышленной электроники, радиотехники, информационно-измерительных приборов и устройств, распределенных информационных технологий, вычислительного интеллекта, автоматизации технологических процессов, в частности, в системах управления и проектирования, информационной безопасности и защиты информации. Представлены статьи по экономике и менеджменту, антикризисному управлению, правовым проблемам современной России, автоматизации управления в технике и образовании, а также работы, касающиеся социокультурных проблем современности, экологии, мониторинга окружающей среды и безопасности жизнедеятельности.

УДК 621.37/.39+681.518 (063)

ББК 32.84я431+32.988я431

ISBN 978-5-902958-42-0

ISBN 978-5-902958-43-7 (Ч. 1)

© ТУСУР, 2025

Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2025», 21–23 мая 2025 г.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- Рулевский В.М. – председатель Программного комитета, ректор ТУСУРа, д.т.н., проф.;
- Куксенко С.П. – заместитель председателя Программного комитета, директор департамента науки и инноваций, д.т.н., доцент;
- Афанасьева М.А., нач. отд. международного сотрудничества ТУСУРа;
- Афонасова М.А., зав. каф. менеджмента ТУСУРа, д.э.н., проф.;
- Бабур-Карателли Г.П., к.т.н., PhD (TU Delft), научный сотрудник лаборатории радиооптики каф. ТОР ТУСУРа;
- Беляев Б.А., зав. лаб. электродинамики и СВЧ-электроники Института физики СО РАН, д.т.н., г. Красноярск (по согласованию);
- Ботаева Л.Б., руководитель направления по оказанию инжиниринговых услуг, АНО «Томский региональный инжиниринговый центр», к.т.н. (по согласованию);
- Васильковская Н.Б., доцент каф. экономики ТУСУРа, к.э.н.;
- Голиков А.М., доцент каф. РТС ТУСУРа, к.т.н., с.н.с.;
- Дмитриев В.М., проф. каф. КСУП ТУСУРа, д.т.н.;
- Еханин С.Г., проф. каф. КУДР ТУСУРа, д.ф.-м.н., доцент;
- Зариковская Н.В., доцент каф. АОИ ТУСУРа, к.ф.-м.н.;
- Зейниденов А.К., PhD, зав. каф. радиофизики НАО Карагандинский университет им. академика Е.А. Букетова, проф., г. Караганда (Казахстан) (по согласованию);
- Исакова А.И., доцент каф. АСУ ТУСУРа, к.т.н.;
- Карташев А.Г., проф. каф. РЭТЭМ ТУСУРа, д.б.н.;
- Катаев М.Ю., проф. каф. АСУ ТУСУРа, д.т.н.;
- Ким М.Ю., зав. каф. ИСР ТУСУРа, к.и.н., доцент;
- Костина М.А., доцент каф. УИ, к.т.н.;
- Костюченко Е.Ю., и.о. зав. каф. БИС ТУСУРа, к.т.н., доцент;
- Коцубинский В.П., зам. зав. каф. КСУП ТУСУРа, доцент каф. КСУП, к.т.н.;
- Красинский С.Л., декан ЮФ ТУСУРа, к.и.н.;
- Крозер В., проф., Университет Гёте, Франкфурт-на-Майне (Германия) (по согласованию);
- Куприянов Е.А., директор Центра по работе с талантливой молодежью ТУСУРа;
- Лукин В.П., зав. лаб. когерентной и адаптивной оптики ИОА СО РАН, д.ф.-м.н., проф., г. Томск (по согласованию);
- Малюк А.А., проф. отделения интеллектуальных кибернетических систем офиса образовательных программ, Институт интеллектуальных кибернетических систем НИЯУ МИФИ, к.т.н., проф., г. Москва (по согласованию);

- Малютин Н.Д., гл.н.с. НИИ Систем электрической связи, проф. каф. КУДР ТУСУРа, д.т.н.;
- Медовник А.В. – начальник научного управления, д.т.н., доцент;
- Мицель А.А., проф. каф. АСУ ТУСУРа, д.т.н.;
- Одинцов С.Д., гл.н.с., Институт пространственных исследований, ICE-CSIC, Барселона (Испания) (по согласованию);
- Озеркин Д.В., доцент каф. РЭТЭМ ТУСУРа, к.т.н.;
- Орлова В.В., зав. каф. ФиС ТУСУРа, д.соц.н., доцент;
- Оскирко В.О., технический директор ООО «Прикладная электроника», к.т.н. (по согласованию);
- Перин А.С., директор Передовой инженерной школы «Электронное приборостроение и системы связи» им. А.В. Кобзева, доцент каф. СВЧКР, к.т.н.;
- Покровская Е.М., зав. каф. ИЯ ТУСУРа, к.фил.н., доцент;
- Разинкин В.П., проф. каф. ТОР, декан факультета радиотехники и электроники Новосибирского государственного технического университета, д.т.н., г. Новосибирск (по согласованию);
- Рогожников Е.В., зав. каф. ТОР ТУСУРа, к.т.н., доцент;
- Ромашко Р.В., член-корреспондент РАН, директор ИАПУ ДВО РАН, д.ф.-м.н., проф., г. Владивосток (по согласованию);
- Семенов В.Д., проф. каф. ПрЭ ТУСУРа, к.т.н., с.н.с.;
- Семенов Э.В., проф. каф. РСС ТУСУРа, д.т.н., доцент;
- Сенченко П.В., доцент каф. АОИ, к.т.н.;
- Суровцев Р.С., доцент каф. ТУ ТУСУРа, д.т.н.;
- Титов В.С., зав. каф. вычислительной техники Юго-Западного государственного университета, д.т.н., проф., заслуженный деятель наук РФ, академик международной академии наук ВШ, г. Курск (по согласованию);
- Троян П.Е., проф. каф. ФЭ ТУСУРа, д.т.н.;
- Труханов А.В., академик-секретарь Отделения химии и наук о Земле Национальной академии наук Беларуси, д.ф.-м.н., проф., г. Минск (Республика Беларусь) (по согласованию);
- Туев В.И., зав. каф. РЭТЭМ ТУСУРа, д.т.н., проф.;
- Ходашинский И.А., проф. каф. КСУП ТУСУРа, д.т.н.;
- Цветкова Н.А., доцент Высшей школы проектной деятельности и инноваций в промышленности института машиностроения, материалов и транспорта Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, к.т.н., г. Санкт-Петербург (по согласованию);
- Чжан Е.А., зам. директора по информационной политике Института космических и информационных технологий (ИКИТ), ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», к.т.н. (по согласованию);
- Шелупанов А.А., президент ТУСУРа, директор ИСИБ, д.т.н., проф.
- Шелупанова П.А., зав. каф. ЭБ ТУСУРа, к.э.н., доцент;
- Шурыгин Ю.А., советник при ректорате по комплексным вопросам функционирования университета ТУСУРа, зав. каф. КСУП, д.т.н., проф.;
- Шумилин А.Г., академик-секретарь Отделения физики, математики и информатики Национальной академии наук Беларуси, д.э.н., проф., г. Минск (Республика Беларусь) (по согласованию);

- Щербаков С.С., академик-секретарь Отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси, д.ф.-м.н., проф., г. Минск (Республика Беларусь) (по согласованию).

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

- Медовник А.В. – председатель Организационного комитета, начальник научного управления, д.т.н., доцент;
- Алябьева А.Д., студентка каф. ЭП, председатель Студенческого научного сообщества «Система»;
- Боберь Ю.Н., специалист по учебно-методической работе ОАиД;
- Климов А.С., председатель Совета молодых ученых, с.н.с. лаборатории плазменной электроники каф. физики, д.т.н.;
- Коротина Т.Ю., зав. аспирантурой, ОАиД, к.т.н.;
- Михальченко Т.С., специалист по работе с молодежью ОПиРШ;
- Покровская Е.М., зав. каф. ИЯ, к.фил.н.;
- Юрченкова Е.А., вед. инженер ОАиД, к.х.н.;

СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

Секция 1. Радиотехника и связь

Подсекция 1.1. Радиотехнические системы и распространение радиоволн. Председатель секции – Аникин Алексей Сергеевич, доцент каф. РТС, к.т.н.; зам. председателя – Мещеряков Александр Алексеевич, доцент каф. РТС, к.т.н.

Подсекция 1.2. Проектирование и эксплуатация радиоэлектронных средств. Председатель секции – Озёркин Денис Витальевич, доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н., доцент; зам. председателя – Понамарев Дмитрий Евгеньевич, преподаватель каф. КИПР.

Подсекция 1.3. Радиотехника. Председатель секции – Семенов Эдуард Валерьевич, проф. каф. РСС, д.т.н., доцент; зам. председателя – Артищев Сергей Александрович, и.о. зав. каф. КУДР, к.т.н.

Подсекция 1.4. Интеллектуальные видеоинформационные технологии. Председатель секции – Курячий Михаил Иванович, проф. каф. ТУ, к.т.н., с.н.с.; зам. председателя – Каменский Андрей Викторович, доцент каф. ТУ, к.т.н.

Подсекция 1.5. Системы беспроводной связи и интернета вещей. Председатель секции – Рогожников Евгений Васильевич, зав. каф. ТОР, к.т.н., доцент; зам. председателя – Дмитриев Эдгар, старший преподаватель каф. ТОР.

Подсекция 1.6. Интеллектуальные системы проектирования технических устройств. Председатель секции – Шурыгин Юрий Алексеевич, советник при ректорате по комплексным вопросам функционирования университета, д.т.н., проф.; зам. председателя – Черкашин Михаил Владимирович, доцент каф. КСУП, к.т.н.

Секция 2. Электроника и приборостроение

Подсекция 2.1. Проектирование биомедицинских электронных и нанoeлектронных средств. Председатель секции – Еханин Сергей Георгиевич, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н., доцент; зам. председателя – Славникова Марина Михайловна, доцент каф. КУДР.

Подсекция 2.2. Разработка контрольно-измерительной аппаратуры. Председатель секции – Бомбизов Александр Александрович, начальник СКБ «Смена», к.т.н.; зам. председателя – Тренкаль Евгений Игоревич, доцент каф. КУДР, к.т.н.

Подсекция 2.3. Физическая и плазменная электроника. Председатель секции – Троян Павел Ефимович, проф. каф. ФЭ, д.т.н.; зам. председателя – Смирнов Серафим Всеволодович, проф. каф. ФЭ, д.т.н.

Подсекция 2.4. Промышленная электроника. Председатель секции – Семенов Валерий Дмитриевич, проф. каф. ПрЭ, к.т.н., с.н.с.; зам. председателя – Михальченко Сергей Геннадьевич, зав. каф. ПрЭ, д.т.н.; Осирко Владимир Олегович, технический директор ООО «Прикладная электроника», к.т.н.

Подсекция 2.5. Оптические информационные технологии, нанофотоника и оптоэлектроника. Председатель секции – Перин Антон Сергеевич, директор Передовой инженерной школы «Электронное приборостроение и системы связи» им. А.В. Кобзева, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.; зам. председателя – Долгирев Виктор, ассистент каф. СВЧиКР, инженер ЛФИС Передовой инженерной школы «Электронное приборостроение и системы связи» им. А.В. Кобзева.

Подсекция 2.6. Электромагнитная совместимость. Председатель секции – Суровцев Роман Сергеевич, доцент каф. ТУ, д.т.н.; зам. председателя – Белоусов Антон Олегович, доцент каф. ТУ, к.т.н.

Подсекция 2.7. Светодиоды и светотехнические устройства. Председатель секции – Туев Василий Иванович, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Солдаткин Василий Сергеевич, доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.

Подсекция 2.8. Робототехника. Председатель секции – Коцубинский Владислав Петрович, доцент каф. КСУП, к.т.н.; зам. председателя – Шандаров Евгений Станиславович, старший преподаватель каф. ЭП.

Секция 3. Информационные технологии и системы

Подсекция 3.1. Интегрированные информационно-управляющие системы. Председатель секции – Катаев Михаил Юрьевич, проф. каф. АСУ, д.т.н.; зам. председателя – Суханов Александр Яковлевич, доцент каф. АСУ, к.т.н.

Подсекция 3.2. Распределённые информационные технологии и системы. Председатель секции – Сенченко Павел Васильевич, доцент каф. АОИ, к.т.н.; зам. председателя – Сидоров Анатолий Анатольевич, зав. каф. АОИ, к.э.н., доцент.

Подсекция 3.3. Автоматизация управления в технике и образовании. Председатель секции – Дмитриев Вячеслав Михайлович, проф. каф. КСУП, д.т.н.; зам. председателя – Ганджа Тарас Викторович, проф. каф. КСУП, д.т.н., доцент.

Подсекция 3.4. Вычислительный интеллект. Председатель секции – Ходашинский Илья Александрович, проф. каф. КСУП, д.т.н.; зам. председателя – Сарин Константин Сергеевич, доцент каф. КСУП, к.т.н.

Подсекция 3.5. Молодежные инновационные научные и научно-технические проекты. Председатель секции – Костина Мария Алексеевна, доцент каф. УИ, к.т.н.; зам. председателя – Нариманова Гуфана Нурлабековна, зав. каф. УИ, декан ФИТ, и.о. проректора по УРИМД, к.ф.-м.н., доцент.

Подсекция 3.6. Инструментальные средства автоматизации проектирования, управления и обработки данных. Председатель секции – Хабибулина Надежда Юрьевна, доцент каф. КСУП, к.т.н.; зам. председателя – Потапова Евгения Андреевна, ст. преподаватель каф. КСУП.

Секция 4. Информационная безопасность

Подсекция 4.1. Методы и системы защиты информации. Информационная безопасность. Председатель секции – Шелупанов Александр Александрович, президент ТУСУРа, директор ИСИБ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Новохрестов Алексей Константинович, доцент каф. КИБЭВС, к.т.н.

Подсекция 4.2. Цифровые системы радиосвязи и средства их защиты. Председатель секции – Голиков Александр Михайлович, доцент каф. РТС, к.т.н., с.н.с.; зам. председателя – Громов Вячеслав Александрович, доцент каф. РТС, к.т.н.

Подсекция 4.3. Экономическая безопасность. Председатель секции – Шелупанова Полина Александровна, зав. каф. ЭБ, к.э.н., доцент; зам. председателя – Колтайс Андрей Станиславович, преподаватель каф. ЭБ.

Подсекция 4.4. Искусственный интеллект и его приложения. Председатель секции – Костюченко Евгений Юрьевич, и.о. зав. каф. БИС, к.т.н., доцент; зам. председателя – Новохрестова Дарья Игоревна, доцент каф. КИБЭВС, к.т.н.

Секция 5. Экономика, управление, социальные и правовые проблемы современности

Подсекция 5.1. Моделирование в экономике. Председатель секции – Мицель Артур Александрович, проф. каф. АСУ, д.т.н.; зам. председателя – Грибанова Екатерина Борисовна, проф. каф. АСУ, д.т.н.

Подсекция 5.2. Информационные системы в экономике. Председатель секции – Исакова Анна Ивановна, доцент каф. АСУ, к.т.н.; зам. председателя – Григорьева Марина Викторовна, доцент каф. АСУ, к.т.н.

Подсекция 5.3. Реализация современных экономических подходов в финансовой и инвестиционной сферах. Председатель секции – Васильковская Наталья Борисовна, доцент каф. экономики, к.э.н.; зам. председателя – Цибульников Валерия Юрьевна, зав. каф. экономики, к.э.н., доцент.

Подсекция 5.4. Проектный менеджмент и его использование в цифровой экономике. Председатель секции – Афонасова Маргарита Алексеевна, зав. каф. менеджмента, д.э.н., проф.; зам. председателя – Богомолова Алена Владимировна, доцент каф. менеджмента, декан ЭФ, к.э.н.

Подсекция 5.5. Современные социокультурные технологии в организации работы с молодежью. Председатель секции – Орлова Вера Вениаминовна, зав. каф. ФиС, д.соц.н., доцент; зам. председателя – Шевченко Лариса Владимировна, доцент каф. ФиС, к.филос.н.

Подсекция 5.6. Актуальные проблемы социальных коммуникаций в современном обществе. Председатель секции – Ким Максим Юрьевич, зав. каф. ИСР, к.ист.н., доцент; зам. председателя – Куренков Артем Валериевич, доцент каф. ИСР, к.ист.н.

Подсекция 5.7. Актуальные вопросы частного права в условиях цифровой трансформации. Председатель секции – Мельникова Валентина Григорьевна, доцент, зав. каф. ИГПиПОИД, к.ю.н.; зам. председателя – Часовских Кристина Викторовна, ст. преподаватель каф. ИГПиПОИД.

Подсекция 5.8. Современные тенденции развития российского права. Председатель секции – Ахмедшин Рамиль Линарович, проф. каф. ГПДиПД, д.ю.н.; зам. председателя – Алексеева Татьяна Александровна, доцент каф. ГПДиПД, к.ю.н.

Секция 6 Экология и мониторинг окружающей среды.

Безопасность жизнедеятельности. Председатель секции – Карташев Александр Георгиевич, проф. каф. РЭТЭМ, д.б.н.; зам. председателя – Денисова Татьяна Владимировна, доцент каф. РЭТЭМ, к.б.н.

Секция 7. Открытия. Творчество. Проекты. (Секция для школьников). Председатель секции – Куприянов Евгений Александрович, директор Центра по работе с талантливой молодежью ТУСУРа; зам. председателя – Михальченко Татьяна Сергеевна, специалист по работе с молодежью ОПиРШ УНН.

Секция 8. Postgraduate and Master Students' Research in Electronics and Control Systems. Председатель секции – Покровская Елена Михайловна, зав. каф. ИЯ, доцент, к.филос.н.; зам. председателя – Шпит Елена Ирисметовна, ст. преподаватель каф. ИЯ; Соболевская Ольга Владимировна, ст. преподаватель каф. ИЯ; Таванова Эльвира Борисовна, ст. преподаватель каф. ИЯ.

**Адрес оргкомитета:
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40,
ФГБОУ ВО «ТУСУР»
Научное управление (НУ), к. 205. Тел.: 8-(382-2) 701-524**

1 часть – 1-я секция (подсекции 1.1 – 1.6); 2-я секция (подсекции 2.1 – 2.8).

2 часть – 3-я секция (подсекции 3.1 – 3.6).

3 часть – 4-я секция (подсекция 4.1 – 4.4).

4 часть – 5-я секция (подсекция 5.1 – 5.8); 6-я секция.

7 секция – для школьников издается отдельным сборником.

Генеральные спонсоры

АО «НИИПП»



Томское региональное отделение
ООО «Союз машиностроителей России»



АО «НПФ «Микран»



ООО НПК «ТЕСАРТ»



АО «ИнфоТеКС»



ООО «Научные приборы и системы»



Спонсор

ООО «500M TEX.»



Генеральный спонсор конференции – АО «НИИПП»



АО «НИИПП»
niipp@niipp.ru
www.niipp.ru

634034, г. Томск,
ул. Красноармейская, 99а
Т.: +7 (382-2) 28-82-88,
28-84-83

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» (АО «НИИПП») – одно из ведущих предприятий Госкорпорации «Ростех», флагман в области разработки и создания СВЧ-изделий и оптоэлектронных приборов ИК- и видимого диапазонов. Общество является одним из ведущих предприятий российской электронной промышленности, специализирующихся на разработке и выпуске полупроводниковых приборов в области СВЧ- и оптоэлектроники. По нескольким позициям ассортимента предприятие выпускает продукцию, не имеющую аналогов на отечественном рынке. Текущая деятельность АО «НИИПП» направлена на то, чтобы значительно повысить конкурентоспособность и технологический уровень, которые позволят поднять уровень производительности труда и занять устойчивые позиции на внутреннем и мировом рынках радиоэлектроники. В институте налажен полный цикл от разработки до выпуска готовых изделий.

Предприятие производит продукцию для ВПК и радиоэлектронную продукцию гражданского назначения (СВЧ-ЭКБ, светотехнику, медицинские приборы, промышленную электронику).

НИИПП основан в Томске в 1964 г. для разработки СВЧ- и оптоэлектронных изделий на основе полупроводниковых соединений АЗВ5. Исследование нового материала – арсенида галия – предопределило вектор развития предприятия на последующие 60 лет.

В 1967 г. на базе института заработал завод по серийному выпуску полупроводниковых приборов. Начинаящий как научный институт, НИИПП и сегодня работает с ведущими вузами Томска: Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), Томским политехническим университетом (ТПУ), Томским государственным университетом (ТГУ), Сибирским государственным медицинским университетом (СибГМУ). В 2022 г. у АО «НИИПП» появилась вторая площадка по производству металло-керамических изделий, которая расположена в Великом Новгороде.

АО «НИИПП» входит в состав Союза машиностроителей России, являясь опорным предприятием объединения в регионе.

С октября 2020 г. генеральный директор АО «НИИПП» Е.А. Монастырев возглавляет Томское региональное отделение «СоюзМаш России».

Научно-производственный потенциал АО «НИИПП»: 4 доктора наук, 5 аспирантов, 24 кандидата технических наук, 462 конструктора и технолога.

СВЧ-электроника – одно из главных направлений разработок на предприятии – это создание СВЧ-полупроводниковых приборов, таких как генераторные (диоды Ганна), смесительные, детекторные, настроенные диоды с барьером Шоттки и монолитные интегральные схемы. На предприятии разработаны настроенные корпусные и бескорпусные диоды дм-, см- и мм-диапазонов длин волн, кремниевые и арсенидогаллиевые варикапы и варикапные матрицы, предназначенные для применения в частотно-избирательных схемах дм-, м-, декаметрового и гектометрового диапазонов длин волн. Смесительно-детекторные диоды для ГИС мм- и субмиллиметрового диапазонов типа с балочными выводами стали основой для последующего создания широкого спектра монолитных интегральных схем (МИС) мм-диапазона.

Оптоэлектроника. Параллельно с СВЧ-электроникой в НИИПП развивалось направление оптоэлектроники – от создания первых ИК-диодов на арсениде галлия (базовая технология которых послужила основой для создания высокоскоростного светодиода и серии мощных излучающих ИК-диодов) до оптоэлектронных приборов. Оптоэлектронные приборы производства НИИПП нашли широкое применение в аппаратуре космического назначения, в системах атмосферной оптической связи, активно-импульсных приборах ночного видения, для управления движением объектов. Аппараты, в которых применялись изделия оптоэлектроники НИИПП, побывали в космосе.

Производство гражданского назначения составляет около 30% от объемов производства и активно развивается в АО «НИИПП».

Лидирующее направление – **производство светотехнической продукции** (светодиодные светильники и лампы, более 100 наименований, более 25 патентов и авторских свидетельств в области разработки и конструирования светотехники). АО «НИИПП» предлагает энергоэффективную высококачественную светотехническую продукцию для освещения широкого спектра объектов. Светильники собраны на основе отечественной компонентной базы со степенью локализации в НИИПП, имеют все необходимые разрешительные сертификаты, лицензии и соответствия.

В 2022 г. АО «НИИПП» представило уникальный для российского рынка продукт – **зондовые станции** собственного производства,

предназначенные для измерений в области СВЧ-электроники. В 2022–2023 гг. выполнены поставки ручных зондовых станций Omega Air-150 СОАХ на ведущие российские предприятия радиоэлектронной промышленности, в измерительные центры и научные лаборатории; заключены контракты на поставку полуавтоматических зондовых станций Terra-200 СОАХ; предприятие готово также выполнять поставки программно-аппаратных комплексов (ПАК) для измерения параметров монолитных интегральных схем на неразделенных полупроводниковых пластинах. Полностью российское решение задачи импортозамещения в условиях санкций, при этом более эффективное по соотношению цена/качество по сравнению с любыми импортными аналогами.

Зарядные устройства для аккумуляторов «Кедр-Авто» производства АО «НИИПП» занимают первые места в рейтингах и конкурсах регионального и федерального уровня (в 2023 г. – «Автокомпонент года», «Лучшие товары Томской области»).

*Генеральный директор АО «НИИПП» –
Монастырев Евгений Александрович*

Генеральный спонсор конференции – АО «НПФ «МИКРАН»



АО «НПФ «Микран»
634041 г. Томск,
пр-т Кирова, д. 51д

Т.: +7 (382-2) 90-00-29
Ф.: +7 (382-2) 42-36-15
www.micran.ru

АО «НПФ «Микран» – ведущий производитель радиоэлектроники России, успешно конкурирующий с зарубежными компаниями. В 1991 г. Виктор Яковлевич Гюнтер с командой из семи человек создал предприятие на базе научной лаборатории Томского института автоматизированных систем управления и радиоэлектроники (сейчас ТУСУР).

Основные направления деятельности сегодня – производство телекоммуникационного оборудования, контрольно-измерительной аппаратуры и аксессуаров СВЧ-тракта, сверхвысокочастотной электроники и модулей, радаров для навигации и обеспечения безопасности, мобильные комплексы связи, комплексные решения в области связи и автоматизации.

Множество наших разработок являются уникальными: начиная от электронной компонентной базы СВЧ и заканчивая серийными изделиями и комплексными решениями. «Микран» активно внедряет инновационные разработки, контролирует процесс создания технологии и отслеживает качество выпускаемой продукции.

В 2020 г. под эгидой Минпромторга «Микран» был включен в перечень системообразующих организаций Российской Федерации в числе предприятий радиоэлектронной отрасли.

Практически с самого начала своей деятельности «Микран» активно взаимодействует с томскими университетами. В 2012 г. была учреждена стипендия имени основателя «Микрана» Виктора Яковлевича Гюнтера. На стипендию могут претендовать студенты технических направлений ТУСУРа, ТПУ и ТГУ, которые имеют достижения в учебной, научной, спортивной и общественной деятельности.

Кроме того, с 2019 г. в компании успешно реализуется проект стажировки для студентов и молодых специалистов технических специальностей MICRANstart. Участники стажировки получают возможность работать над реальными проектами компании под руководством опытных наставников, а лучших из них «Микран» приглашает стать частью своей дружной команды.

*Генеральный директор АО «НПФ «Микран» –
Парамонова Вера Юрьевна*

Генеральный спонсор конференции – ООО НПК «ТЕСАРТ»



НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ
ТЕСАРТ

ООО НПК «ТЕСАРТ» Т./ф.: +7 (382-2)
634015, г. Томск, 90-05-30
ул. Циолковского, Эл. почта:
д. 19, каб. 318 office@tes-art.ru
www.tesart.ru

Научно-производственная компания «ТЕСАРТ» – высокотехнологичный бизнес полного цикла в области комплексных радиоизмерительных систем. Общество существует на рынке с 07 мая 2015 г. благодаря коллаборации инженеров, исследователей, конструкторов и технологов Томского научного центра.

Все технические решения компании основаны на инновационном подходе в области микроволновых измерений, электромехатронных систем, телекоммуникаций и радаров.

Основная продукция компании:

1. Опорно-поворотные устройства и прецизионные позиционеры.
2. Радиопоглощающий материал.
3. Безэховые экранированные камеры.
4. Автоматизированные измерительно-вычислительные комплексы.
5. СВЧ-электроника.

За 10 лет существования компании реализовано более 50 крупных проектов, основу которых составляет испытательное оборудование собственного отечественного производства. Благодаря квалифицированным сотрудникам, которых в 2025 г. насчитывается 120 человек, компания непрерывно модернизирует производственную базу и стремится расширить свои возможности. Поэтому нас выбирают такие заказчики, как Госкорпорации «Роскосмос» и «Ростех», АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», АО Корпорация «Тактическое ракетное вооружение», ООО «Бюро 1440» и др.

Мы чутко подходим к каждому проекту и заботимся о качестве наших продуктов на всех стадиях жизненного цикла, включая техническое сопровождение в процессе эксплуатации. Нам важно, чтобы наше испытательное оборудование полностью соответствовало запросам, решало основные задачи, при этом улучшало качество и скорость работы заказчиков.

С самого старта своей деятельности НПК «ТЕСАРТ» активно развивает связи с ведущими университетами Томска и страны в области прикладных научных исследований по тематике, соответствующей

щей профилю компании. В нашей компании успешно реализуется программа стажировки для студентов и молодых специалистов технических специальностей. Участники стажировки получают возможность работать над реальными проектами компании под руководством опытных наставников и впоследствии стать частью нашей дружной команды.

*Директор ООО НПК «ТЕСАРТ» –
Семкин Артем Олегович*

Генеральный спонсор конференции – АО «ИнфоТеКС»



АО «ИнфоТеКС»

127083, Москва,

ул. Отрадная, 2Б, стр. 1

Т.: +7 (495) 737-61-92,

8 (800) 250-0-260

www.infotecs.ru

АО «ИнфоТеКС» является ведущим разработчиком, а также производителем высокотехнологичных программных и программно-аппаратных средств и систем защиты информации. Входит в ТОП-10 крупнейших российских компаний в сфере информационной безопасности. Будучи лидером, ИнфоТеКС активно развивает партнёрскую сеть, в которую на данный момент входит свыше 400 компаний. В штате трудоустроено более 1 700 сотрудников, а офисы открыты в 13 городах России.

Главный продукт компании – бренд ViPNet. В этой торговой марке более 50 различных продуктов (программных и программно-аппаратных комплексов), каждый из которых может содержать в себе несколько функциональных модулей. Они по праву признаны самым масштабируемым и гибким решением для построения защищённых сетей, которое соответствует всем требованиям законодательства РФ. ViPNet широко известен среди большинства отраслевых специалистов, ведь с его помощью защищено уже более 10 млн рабочих станций. Например, все элементы системы продажи билетов в ОАО «Российские железные дороги» и Портал государственных услуг РФ.

Помимо этого, АО «ИнфоТеКС» плодотворно взаимодействует с регуляторами, профильными комитетами Росстандарта и профессиональным сообществом по вопросам стандартизации в сфере защиты информации. Эксперты компании принимали участие в разработке нового стандарта ГОСТ Р 34.11–2012 (Стрибог) и криптографического протокола CRISP. А специалисты являются членами таких профильных общественных организаций и ассоциаций, как АРПП «Отечественный Софт», «Ассоциация предприятий компьютерных и информационных технологий», «Ассоциация документальной электросвязи», «Ассоциация защиты информации» и «Ассоциация ЕВРААС».

Важным направлением для компании является партнерство и сотрудничество с образовательными учреждениями, поддержка научных разработок и исследовательских проектов, а также обучение и продвижение молодых специалистов. Поэтому уже более 12 лет «ИнфоТеКС» активно работает над развитием кадрового потенциала в ИТ- и ИБ-отраслях и реализует специальный проект «ИнфоТеКС Акаде-

мия».

В рамках партнерской программы «ИнфоТеКС Академия» организует площадки по обмену опытом, взаимодействует с вузами, колледжами страны, организует стажировки для студентов, проводит грантовую и экспертную поддержку разработок в области информационной безопасности, интегрирует в учебный процесс экспертизу штатных специалистов ГК «ИнфоТеКС».

«ИнфоТеКС Академия» сотрудничает и заинтересована в сотрудничестве с:

1. Образовательными учреждениями различного уровня подготовки – школы, колледжи и вузы, желающими сотрудничать с отраслевым партнером по направлению образовательной, научной деятельности, проведения совместных мероприятий.

2. Партнёрами компании, которые нуждаются в квалифицированных специалистах.

3. Учредителями и регуляторами различных программ и проектов федерального и регионального уровня в области науки и образования.

4. Обучающимися и недавними выпускниками вузов, которые хотят получить опыт работы в крупной компании или повысить уровень своих знаний, а также принять участие в различных мероприятиях соревновательного плана.

*Генеральный директор АО «ИнфоТеКС» –
Чапчаев Андрей Анатольевич*

Генеральный спонсор конференции – Группа компаний «НАУЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ»



Группа компаний	Т.: (383-3)30-82-95
«Научное оборудование»	Эл. почта:
630090, г. Новосибирск,	sales@spegroup.ru
ул. Николаева, 11/5	www.spegroup.ru

Группа компаний «Научное оборудование» более 25 лет существует на рынке высокотехнологичного оборудования и занимается разработкой собственных уникальных технологических решений и производством оборудования для их реализации.

Сегодня «Научное оборудование» представляет целую группу компаний, в которую входят торговые организации, специализирующиеся на поставке отдельных направлений оборудования, научно-производственное предприятие, занимающееся созданием радиоизмерительных комплексов, исследовательские команды, занятые разработкой наукоемких решений для приборостроительной, химической и биологической отраслей.

Большое внимание мы уделяем организации совместной работы с научными коллективами и промышленными предприятиями электронной и космической отраслей для решения широкого круга задач наших российских и иностранных партнеров. Сотрудничаем с научными организациями СО РАН, УРО РАН, ДВО РАН, промышленными предприятиями, технологическими компаниями, учебными заведениями высшего образования.

Выстраиваем партнерские отношения с представителями многих отраслей экономики, предлагаем комплексный подход к решению задач заказчика. Выступаем отраслевым интегратором и прорабатываем комплексно любые сложные задачи.

Среди реализованных проектов компании – оснащение учебных аудиторий в Региональном центре выявления, поддержки и развития способностей и талантов у детей и молодежи «Алтайр»; Физико-математической школе им. А.М. Лаврентьева при НГУ, разработки в области радиоизмерения и СВЧ, микроэлектроники, вакуумного, рентгеновского, испытательного и технологического оборудования, системы видеорегистрации, микроскопии, оптики и т.д.

В своей деятельности мы считаем важным следить за юридической чистотой и безопасностью, объективностью и достоверностью, открытостью и компетентностью.

Наши заказчики получают оборудование, оформленное с соблюдением всех необходимых формальностей. Мы предоставляем партнерам полную и достоверную информацию по всем интересующим вопросам и работаем на эффективный результат.

В нашем арсенале более 1 050 брендов и более 7 750 реализованных контрактов за три года. За каждым нашим проектом стоит большая команда высококвалифицированных технических специалистов в самых разнообразных отраслях науки и техники.

Нам доверяют такие заказчики, как «Росатом» и «Роскосмос», инновационный центр «Сколково», УК «Биотехнопарк Кольцово», филиал ПАО «Компания Сухой», НАЗ им. В.П. Чкалова, СибГУ им. М.Ф. Решетнева и др.

Надеемся на долгосрочное сотрудничество, будем рады новым партнерам и заказчикам.

*Директор ООО «Научные приборы и системы» –
Гордеев Владимир Дмитриевич*

Спонсор конференции – «50ohm Technologies»

50ohm Technologies

 634045, г. Томск

 info@50ohm.tech

 50ohm.tech.ru

 +7-923-

408-04-08

 fiftyohm

 fiftyohm

«50ohm Technologies» – российская компания из г. Томска. Ее специализация – разработка программного обеспечения для автоматизации измерений, моделирования электронных компонентов и проектирования высокочастотных и сверхвысокочастотных радиоэлектронных устройств. 50ohm Technologies с 2016 г. успешно помогает предприятиям и инженерам ускорять разработку новых устройств. Миссия компании – помочь специалистам по СВЧ-электронике сосредоточиться на сложных и творческих задачах за счет использования удобных интеллектуальных инструментов, ускоряющих решение технических задач.

Основные направления деятельности 50ohm Technologies:

- **Автоматизация проектирования СВЧ-устройств.** Компания разрабатывает «умные» программные инструменты для проектирования СВЧ-интегральных схем. С помощью методов искусственного интеллекта такие программы автоматически генерируют варианты схем и топологий (например, усилителей, аттенуаторов, фазовращателей) на основе заданных требований и элементной базы. Инженер получает сразу несколько готовых проектов и выбирает оптимальный, что значительно ускоряет самый сложный этап разработки и избавляет от рутинных операций.

- **Моделирование электронных компонентов.** «50ohm Technologies» обладает большим опытом в создании точных моделей пассивных и активных компонентов, для полупроводниковых соединений группы $A^{III}B^V$. Компания поставляет эти модели в формате комплекта средств проектирования (PDK) для популярных САПР. Автоматизация расчётов и применение собственных методик экстракции позволяют значительно сократить затраты времени и средств при разработке новых изделий.

- **Автоматизация измерений и испытаний.** «50ohm Technologies» создаёт программно-аппаратные комплексы для автоматизированного тестирования радиоэлектронных устройств на базе оборудования заказчика. Готовые сценарии измерений для типовых компо-

ментов и приборов позволяют значительно сократить время испытаний и снизить вероятность ошибок. Внедрение таких решений повышает эффективность работы измерительной лаборатории предприятия без необходимости приобретения дорогостоящих сторонних систем.

Опираясь на передовые технологии и экспертизу команды, «50ohm Technologies» обеспечивает своим партнерам ускорение цикла разработки и улучшение качества результатов. Решения компании уже помогли ряду предприятий сократить сроки вывода продуктов на рынок и оптимизировать издержки. «50ohm Technologies» поддерживает научно-техническую конференцию и развитие профессионального сообщества. Компания открыта к сотрудничеству и нацелена и дальше оставаться надёжным партнёром для организаций радиоэлектронной отрасли.

*Директор «50ohm Technologies» –
Калентьев Алексей Анатольевич*



Секция 1
РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ
(стр. 25 – 158)

Секция 2
ЭЛЕКТРОНИКА
И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
(стр. 159 – 325)

Секция 1

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

ПОДСЕКЦИЯ 1.1

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Председатель – Аникин А.С., доцент каф. РТС, к.т.н.;
зам. председателя – Мещеряков А.А., доцент каф. РТС, к.т.н.

УДК 542.21

УДОБСТВА И ПРЕИМУЩЕСТВА В ПРИМЕНЕНИИ МАКЕТНЫХ ПЛАТ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО СХЕМОТЕХНИКЕ

Ю.М. Зубарь, Р.М. Абсалямов, студенты каф. РТС
Научный руководитель А.С. Аникин, доцент каф. РТС, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, zubarjm2004@gmail.com

Рассматривается методика проведения лабораторных работ по схемотехнике с использованием макетных плат, а также предложены новые лабораторные работы. Приведены результаты работы.

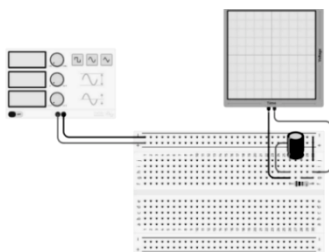
Ключевые слова: макетная плата, лабораторная работа, схемотехника.

Для радиотехников и радиоэлектронщиков важно уметь работать с электрическими схемами на практике. Для этого им необходимо понимать схемотехнику электронных устройств и знать свойства компонентов электрических схем, а точнее, знать, как это всё выглядит в реальной жизни. К сожалению, как показывает практика, в большинстве случаев у студентов отсутствует представление о том, как вся электроника выглядит в реальной жизни, поскольку практически все лабораторные работы выполняются уже на готовых лабораторных

стендах или в электронных симуляторах. Для того чтобы у студентов была возможность поработать с реальными электрическими схемами, собирая их самим, были разработаны лабораторные работы по схемотехнике с применением макетных плат.

Целью статьи является описание преимущества выполнения лабораторных работ по схемотехнике на макетных платах перед лабораторными работами на программных симуляторах.

Расскажем о преимуществах макетных плат перед электронными симуляторами и печатными платами. Макетная плата очень удобна и проста в применении в целях сборки электрических схем. В том случае, когда необходимо проверить работу какого-либо компонента схемы или его свойств, макетная плата является наиболее оптимальным выбором, поскольку с её применением появляется возможность выполнить всю работу, не используя паяльник. Также одним из преимуществ макетных плат является то, что её можно использовать многократно, в отличие, например, от печатных плат [1].



На рис. 1 можно ознакомиться с тем, как выглядит электрическая схема, собранная на макетной плате.

Рис. 1. Пример сборки электрической схемы на макетной плате в электронном симуляторе

Суть разработанных лабораторных работ состоит в том, чтобы студенты, используя электронный симулятор электрических схем, имели возможность проверить работу собранной схемы и сравнить показания приборов с показаниями, выведенными в симуляторе. Данная идея поможет студентам получить представление о том, как выглядят компоненты электрических схем в реальной жизни, а также поможет им приобрести навыки работы с различным оборудованием, например, мультиметром.

К данным лабораторным работам было разработано методическое пособие, в котором было подробно расписано всё об используемом оборудовании, а также сами лабораторные работы. Первая лабораторная работа является разминочной. Она нужна для того, чтобы студенты могли ознакомиться с различными компонентами электрических схем и оборудованием. Суть данной лабораторной работы состоит в том, что студентам необходимо построить вольт-амперные характеристики (ВАХ) диода и светодиода, используя для этого схему, представленную на рис. 2.

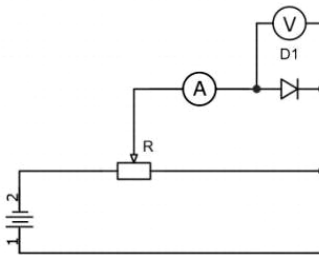


Рис. 2. Электрическая схема для изучения диодов и светодиодов

Также была разработана лабораторная работа по изучению переходных процессов. В ней студенты смогут понять, как влияют различные подключения конденсаторов в электрической цепи на работу переходных процессов, получают возможность ознакомиться с разновидностью конденсаторов, их физикой работы и свойствами. Также у них будет возможность на практике понять разницу между постоянными и переменными токами и напряжениями.

Ещё одна лабораторная работа, которая посвящена изучению биполярного транзистора, является той же, что имелаась и ранее, только, как и говорилось выше, с использованием реального оборудования помимо электронного симулятора «Electronic Workbench», а также с введением ещё одного небольшого новшества в виде нагревания электрических схем коллекторной и эмиттерной стабилизаций паяльным феном с целью рассмотрения влияния температуры на работу биполярного транзистора.

На рис. 1 можно ознакомиться со схемами коллекторной и эмиттерной стабилизаций.

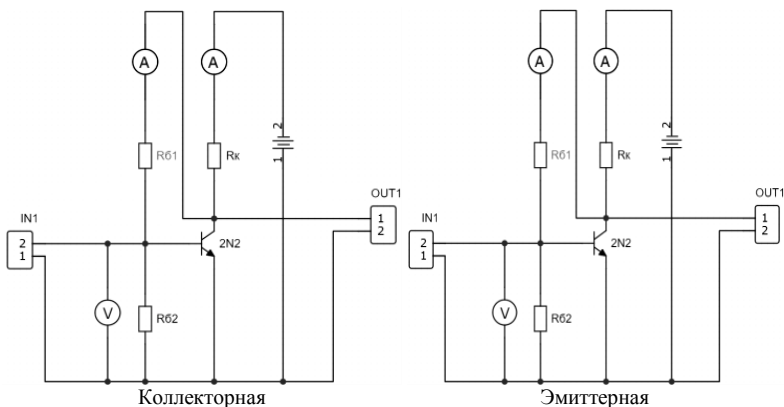


Рис. 1. Схемы коллекторной и эмиттерной стабилизаций

Выводы. Предложенные лабораторные работы являются оптимальным вариантом в тренировке студентов по работе с реальным оборудованием. Использование предложенных методов проведения практических занятий по схемотехнике поможет студентам не только изучить работу различных элементов электрических схем на практике, но и в действительности понять физику работы электрического оборудования. Данные навыки и представления помогут студентам в их становлении как высококлассных инженеров и специалистов в различных технических сферах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макетные платы [Электронный ресурс]: справочная информация о макетных платах. – URL: <https://www.chipdip.ru/catalog-show/socket-breadboards> (дата обращения: 22.02.2025).

УДК 621.396.75

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ

М.П. Неволин, оператор роты (научной)

Научные руководители: А.А. Негурица,

адъюнкт научно-исследовательского центра;

Д.М. Закиров, нач. отд. (среднего профессионального образования)

г. Санкт-Петербург, Военная орденов Жукова и Ленина

Краснознаменная академия связи им. Маршала Советского Союза

С.М. Буденного МО РФ, maksim.nevolin.20000@mail.ru

Рассматриваются методы повышения помехозащищенности сетей радиосвязи в условиях электронной борьбы. Основное внимание уделяется анализу современных технологий, таких как псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ) и формирование последовательностей сверхкоротких электромагнитных импульсов (СКИ ЭМИ). Приведены результаты экспериментальных исследований для систем беспроводной передачи данных стандартов Wi-Fi, WiMax и DECT, подтверждающие теоретические выводы о необходимости адресного подхода к формированию помехозащищенных протоколов.

Ключевые слова: помехозащищенность, электронная борьба (РЭБ), помехи, ППРЧ, СКИ ЭМИ.

В современных условиях развития технологий и вооружений вопросы обеспечения помехозащищенности систем радиосвязи стано-

вятся все более актуальными. Радиоэлектронная борьба (РЭБ) представляет собой комплекс мероприятий, направленных на обнаружение, анализ и подавление сигналов противника. В данной статье рассматриваются основные методы повышения помехозащищенности сетей радиосвязи с учетом воздействия преднамеренных помех, а также особенности их применения в условиях РЭБ.

Методы ППРЧ как основа помехозащищенности. Один из наиболее эффективных методов повышения помехозащищенности – это ППРЧ (псевдослучайная перестройка рабочей частоты). Этот метод заключается в быстрой смене частоты согласно заранее заданной программе, которая известна только передатчику и приемнику. Системы связи с ППРЧ демонстрируют высокую разведзащищенность и устойчивость к организованным помехам [1].

1. *Механизм работы.* На рис. 1 представлена типовая структурная схема системы радиосвязи с ППРЧ. В такой системе каждый символ информации передается на разных частотах, что затрудняет вскрытие сигнала средствами радиотехнической разведки (РТР) [2].



Рис. 1. Структурная схема системы радиосвязи с ППРЧ

2. *Ограничения метода ППРЧ.* Основными ограничениями применения ППРЧ являются:

- сложность реализации устройств синхронизации между передатчиком и приемником;
- дополнительные временные задержки при переключении частоты.

Однако несмотря на эти недостатки, метод ППРЧ широко используется в современных военных системах радиосвязи, таких как JTIDS, «Акведук» и «Азарт» [3].

Воздействие СКИ ЭМИ. Сверхкороткие электромагнитные импульсы (СКИ ЭМИ) представляют собой особую угрозу для систем радиосвязи. Они формируют широкополосную помеху, которая может одновременно поражать несколько несущих частот [4].

1. *Формирование пакетов СКИ ЭМИ.* Для повышения эффективности воздействия рекомендуется использовать пакеты импульсов с

задержкой между импульсами Δt , соизмеримой с периодом несущей частоты

$$\Delta t \approx \frac{1}{f_{\text{нес}}} . \quad (1)$$

Частота следования пакетов должна быть не менее символьной скорости модуляции

$$f_{\text{пакет}} \geq f_{\text{симв}} . \quad (2)$$

Этот подход позволяет максимизировать вероятность блокирования канала связи [5].

2. *Зависимость от параметров системы.* Степень влияния СКИ ЭМИ может быть оценена через отношение спектральных плотностей энергий

$$K_{\text{энсп}} = \frac{P_{\text{ски}}}{P_{\text{ист}}} . \quad (3)$$

где $P_{\text{ски}}$ – спектральная плотность энергии СКИ ЭМИ, $P_{\text{ист}}$ – спектральная плотность энергии полезного сигнала.

Комплексные решения. Рассмотрим систему связи стандарта IEEE 802.16 (WiMax) с центральной частотой 2,4 ГГц, полосой канала 20 МГц и скоростью передачи данных 54 Мбит/с. Для защиты от СКИ ЭМИ с напряженностью поля FOM = 1500 В/м на расстоянии $r_{\text{ски}} = 15$ м рассчитаем необходимые параметры:

$$f_{\text{пакет}} \geq f_{\text{симв}} = \frac{R}{n \cdot N} = \frac{54 \cdot 10^6}{6 \cdot 128} \approx 67 \text{ кГц} , \quad (4)$$

$$\Delta t \approx \frac{1}{f_{\text{нес}}} = \frac{1}{2,4 \cdot 10^9} \approx 0,42 \text{ мс} . \quad (5)$$

При таких параметрах степень влияния СКИ ЭМИ будет минимальной.

Заключение. Анализ существующих методов показывает, что наиболее перспективными являются комбинированные решения, включающие:

- использование режима ППРЧ для повышения разведзащищенности;
- применение корректирующих кодов для компенсации ошибок;
- формирование пакетов СКИ ЭМИ с учетом временных и частотных характеристик полезного сигнала.

Данные методы могут быть успешно применены как в гражданских, так и в военных системах радиосвязи. Особенно важно их ис-

пользование в условиях РЭБ, где требуется высокая устойчивость к организованным помехам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазырин Д.А. Анализ методов повышения помехоустойчивости в цифровых системах радиосвязи / Д.А. Глазырин, Л.С. Гурьянова // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, № 9. – С. 891–901.
2. Макаренко С.И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / С.И. Макаренко, М.С. Иванов, С.А. Попов. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.
3. Рябов А.В. Вопросы обеспечения помехоустойчивости систем авиационной радиосвязи в условиях радиоэлектронного конфликта / А.В. Рябов, А.Е. Алексеев // Доклады ВУНЦ ВВС. – 2016. – С. 1–10.
4. Пименов П.Н. Метод оценки помехоустойчивости средств широкополосного радиодоступа к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2015.
5. Сахаров К.Ю. Излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов для испытаний технических средств // Технологии ЭМС. – 2006. – № 2. – С. 10–16.

УДК 629.7.054.07

СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Т.Н. Пушкарёв, ст. преп. каф. КИПР

г. Томск, ТУСУР, pushkarev-timur@mail.ru

Разработанная структурная схема бортового ответчика для БПЛА обеспечит их идентификацию и интегрирование в единую систему организации воздушного движения (ЕС ОрВД).

Ключевые слова: БПЛА, АЗН-В, идентификация, бортовой ответчик.

В последние годы наблюдается значительный рост применения БПЛА в различных отраслях, в связи с чем Федеральное агентство воздушного транспорта Российской Федерации выдвинуло предложение о создании нового класса воздушного пространства для их использования. Данное обстоятельство ставит перед нами задачу идентификации БПЛА и их интегрирование в ЕС ОрВД.

В существующей нормативной правовой базе в области ГА России не приняты НПА, предъявляющие конкретные технологические требования (в частности, массогабаритные и эксплуатационные показатели) к бортовой системе ДАА БПЛА, снабжающей его принципом «обнаруживаю – уклоняюсь».

Как отмечено в статье [1], в ГА для пилотируемых ВС применяется система АЗН-В, позволяющая устанавливать своё местоположение посредством спутниковой навигации и передавать эти данные, а также другую информацию в режиме реального времени другим ВС и службам, управляющим воздушным движением.

В свою очередь, в данный момент в России отсутствует универсальный бортовой ответчик для БПЛА.

В России уже имеются аппаратные решения о встроенной опцией АЗН-В Out, созданные специально для БПЛА, которые были представлены на выставках РЭО для заинтересованных сторон [2].

Однако, как отмечалось ранее, отсутствие НПА, устанавливающих четкие технологические требования к таким системам, на текущий момент не позволяют создать универсальный бортовой ответчик для БПЛА.

Анализ текущих реализаций АЗН-В, предназначенных для идентификации БПЛА, выявил множество недостатков, которые снижают эффективность их применения. С результатами анализа можно ознакомиться в [1].

Разработанная концептуальная схема, свободная от недостатков, отмеченных в [1], изображена на рис. 1.

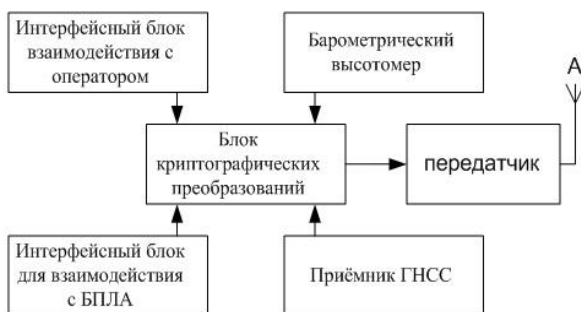


Рис. 1. Концептуальная схема системы идентификации БПЛА

Для более детального ознакомления с концепцией и реализацией данной системы, пожалуйста, обратитесь к источнику [1].

Внедрение данной системы существенно упростит идентификацию и интегрирование БПЛА в уже существующую систему ОрВД. Вследствие этого данная система будет способствовать поддержанию необходимого уровня безопасности авиационной транспортной системы.

Предложенная структурная схема может быть реализована с использованием отечественной элементной базы, обеспечивая надеж-

ность и миниатюризацию. Это позволит обеспечить универсальность решения и его применения на различных типах БПЛА.

Отмечу, что предложенная структурная схема соответствует функциональным требованиям, изложенным в нормативном акте Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2024 г. № 1701.

Важно подчеркнуть необходимость разработки и утверждения Министерством транспорта Российской Федерации НПА, устанавливающего единые технологические стандарты, для устранения разногласий и несовместимости различных реализаций таких систем в авиационно-транспортной сфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пушкарёв Т.Н. Идентификация беспилотных летательных аппаратов // Матер. Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления»: в 2 ч. – Томск: В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева); ТУСУР, 2023. – Ч. 1. – С. 18–21.

2. Описание излучателя сквиттеров ADS-Bee [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://navigat.ru/products/sistemy-nablyudeniya-azn-v/izluchatel-skvitterov-ads-bee/>, свободный (дата обращения: 13.05.2024).

УДК 621

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ОЦЕНКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*А.В. Лубенцов, проф. каф. основ радиотехники и электроники
г. Воронеж, Воронежский институт ФСИИ России,
lubensov@mail.ru*

Проводится системный анализ методов оценки влияния чувствительности измеряемых параметров при определении эффективности функционирования сложных технических систем.

Ключевые слова: сложные технические системы, эффективность, оценка параметров, чувствительность параметров.

Оценка эффективности сложных технических систем (СТС) – задача, требующая комплексного подхода. Анализ чувствительности в оценке сложных технических систем – основной путь к повышению эффективности. Часто используемые модели, основанные на входных и выходных параметрах, упрощают реальность, игнорируя внутренние процессы и состояние отдельных компонентов. Однако именно эти «невидимые» факторы могут существенно влиять на результаты оценки, внося значительную погрешность и искажая реальную карти-

ну. Поэтому анализ чувствительности – ключевой этап, позволяющий выявить узкие места и оптимизировать работу СТС. Анализ чувствительности позволяет определить, насколько изменение значений отдельных входных параметров влияет на выходные показатели модели. Это не просто качественная оценка («влияет/не влияет»), а количественный анализ, позволяющий установить степень влияния каждого параметра. Например, при оценке эффективности радиотехнической аппаратуры (как СТС) входными параметрами могут быть качество канала, качество сигнала, уровень сигнал/шум, внутренние параметры и др., а выходными – достоверность сигнала, качество распознавания и восстановления сигнала и т.д. Анализ чувствительности покажет, насколько изменение входных параметров (например, изменение положения рабочей точки на АЧХ) повлияет на выходной сигнал. Многочисленные исследования подтверждают актуальность анализа представленных вопросов, например, [1, 2].

Методы анализа чувствительности. Существует множество методов анализа чувствительности, выбор которых зависит от сложности модели и доступных данных. К наиболее распространенным относятся следующие.

Метод Монте-Карло. Этот стохастический метод основан на многократном моделировании с использованием случайных значений входных параметров. Анализ результатов позволяет оценить распределение вероятностей для выходных параметров и определить, какие входные параметры оказывают наибольшее влияние на дисперсию выходных показателей.

Метод конечных разностей. Этот детерминированный метод основан на вычислении частных производных выходных параметров по входным. Он позволяет оценить локальную чувствительность модели в окрестности заданной точки.

Анализ чувствительности по методу «варьирования». Задаются диапазоны изменения входных параметров и на основе результатов моделирования вычисляется влияние вариаций каждого параметра на результат. Это позволяет получить представление о влиянии как отдельных параметров, так и их комбинаций.

Регрессионный анализ. Позволяет установить статистически значимые связи между входными и выходными параметрами, оценивая вклад каждого входного параметра в объяснение вариации выходных данных

Практическое применение анализа чувствительности. Результаты анализа чувствительности позволяют решить следующие задачи.
– Выявить критические компоненты и подсистемы.

Фокусируя внимание на элементах СТС, оказывающих наибольшее влияние на итоговые показатели, можно эффективно распределять ресурсы на их модернизацию или ремонт.

– Оптимизировать процессы управления.

Понимание взаимосвязей между входными и выходными параметрами позволяет разработать более эффективные стратегии управления СТС.

– Снизить риски.

Знание наиболее чувствительных параметров позволяет предвидеть потенциальные проблемы и разработать меры по минимизации их влияния.

– Улучшить точность модели.

Выявление наиболее значимых параметров позволяет уточнить модель, сделав её более адекватной реальности.

Заключение. Анализ чувствительности является неотъемлемой частью оценки эффективности СТС. Его применение позволяет перейти от простого описания системы к глубокому пониманию ее поведения, что, в свою очередь, открывает возможности для оптимизации, повышения надежности и эффективности работы всей системы в целом. Выбор конкретного метода анализа зависит от специфики СТС и доступных ресурсов, но конечная цель всегда одна – максимизация эффективности и снижение рисков. Автором предложен и внедрен ряд моделей оценки чувствительности параметров СТС [3–6], однако до полного решения поставленных задач еще далеко.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абидова Е.А. Разработка модели многоканальной многопараметрической системы диагностики // Известия вузов. – Сер.: Технические науки. – 2024. – № 1 (221). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-modeli-mnogokanalnoy-mnogoparametricheskoy-sistemy-dagnostiki> (дата обращения: 11.03.2025).

2. Сиддиков И.Х. Алгоритм и программное обеспечение повышения энергоэффективности источников энергоснабжения на основе цифровых технологий / И.Х. Сиддиков, А.А. Абдумаликов, А.Х. Тожиев, Ю.А. Лежнина // Computational nanotechnology. – 2024. – № 5. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritmi-programmnoe-obespechenie-povysheniya-energoeffektivnosti-istochnikov-energosnabzheniya-na-osnove-tsifrovyyh-tehnologiy> (дата обращения: 11.03.2025).

3. Лубенцов А.В. Системный анализ модели получения характеристик эффективности комплексной системы безопасности // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – № 11. – С. 1–8.

4. Лубенцов А.В. Синтез метода оценки эффективности системы информационной безопасности // Изв. вузов. Электроника. – 2024. – Т. 29, № 1. – С. 118–129.

5. Лубенцов А.В. Синтез иерархической многоуровневой модели параметров для оценки эффективности системы защиты информации в условиях нечетких данных // Известия вузов. – Сер.: Электроника, МИЭТ. – М.: – 2024. – Т. 29, № 2. – С. 236–248.

6. Лубенцов А.В. Комплексные системы безопасности: системный анализ, архитектура, управление жизненным циклом / А.В. Лубенцов, А.В. Душкин. – Воронеж: Научная книга, 2022. – 254 с.

7. Лубенцов А.В. Комплексные системы безопасности: теоретические основы построения и функционирования / А.В. Лубенцов, А.В. Душкин. – ФКОУ ВО Воронежский институт ФСИН России. – Иваново: ИПК «ПресСто», 2023. – 288 с.

ПОДСЕКЦИЯ 1.2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Председатель – Озёркин Д.В., доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.;
зам. председателя – Понамарев Д.Е., преп. каф. КИПР*

УДК 004.896

ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА DELTA DESIGN

И.Г. Быков, преп. каф. КИПР

*Научный руководитель Н.Н. Кривин, зав. каф. КИПР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. КИПР, tdp4tomgate@mail.ru*

Дан анализ возможностей замены зарубежных систем автоматизированного проектирования (САПР) на отечественный продукт Delta Design. В ходе исследования были рассмотрены как положительные, так и отрицательные стороны этого программного обеспечения. Основное внимание уделено ключевым преимуществам Delta Design по сравнению с иностранными аналогами.

Ключевые слова: САПР, система автоматизированного проектирования, Delta Design, 2D-чертежи, 3D-сборки.

Цель данной статьи – изучение потенциала программы Delta Design как средства для замещения зарубежных САПР-аналогов.

Задачи, необходимые для реализации обозначенной цели, заключаются в следующем: проведение анализа ключевых возможностей программы, проверка способности интегрироваться с инструментами для различных видов анализа (включая тепловой и механический), изучение механизма экспорта 3D-моделей печатных плат и узлов, исследование функционала автоматической трассировки печатных плат, а также оценка удобства подготовки конструкторской документации на предприятиях приборостроительной отрасли в соответствии с требованиями действующих стандартов ГОСТ.

Важнейшим направлением стратегии цифровой трансформации в России является постепенный отказ от зарубежного инженерного ПО в пользу отечественных разработок, что способствует укреплению позиций в области проектирования [1].

На данный момент в приборостроительной отрасли активно применяются зарубежные программные решения, среди которых P-CAD, Altium Designer, KiCad и др. Учитывая стратегию импортозамещения, их необходимо заменить на отечественное программное обеспечение САПР. Основные требования к новым программам – это возможность работы с топологией печатных плат, управление библиотеками, наличие связей между компонентами печатного узла и электрической схемой, а также инструменты для разработки и оформления конструкторской документации. Одним из наиболее конкурентоспособных и зрелых российских продуктов в этой области является программа Delta Design.

Delta Design – это передовая российская система для автоматизации проектирования печатных плат, обеспечивающая полный цикл разработки. САПР была изначально разработана с ориентацией на требования российских ГОСТов, но одновременно обеспечивает совместимость с международными нормативами. Программный комплекс предлагает обширный набор инструментов, включающий такие функции, как формирование и обновление базы данных радиокомпонентов; создание и редактирование схем электрических принципиальных; симуляция работы аналоговых и цифровых цепей; анализ итоговых данных; проектирование топологий печатных плат; расстановка элементов и автоматическая/полуавтоматическая разводка проводников; оформление конструкторской документации согласно принятым нормам, а также генерация производственного пакета документов, необходимого для автоматизации технологических процессов [2].

Delta Design имеет ряд преимуществ над другими САПР: AI-driven автотрассировка (применение искусственного интеллекта для автотрассировки, который в последующем учится, от чего качество топологии только растёт), возможность разбивать проект на составные части (например, разделить силовую часть и высокочастотную, после объединив их обратно внутри проекта), оптимизация переходов для минимизации импедансных неоднородностей, современные инструменты работы с микропереходными отверстиями и лазерными сверлениями, расширенные возможности работы с высокочастотными схемами и т.д.

Основные направления анализа: 2D-чертежи (виды, образмеривание, технические требования и т.д.); поддержка работы с 3D-деталью и 3D-сборками (возможность работы с 3D-моделями компонентов, получение сборки печатного узла с последующим её выводом в другую среду); импорт посадочных мест под компоненты из других сред (P-CAD, Altium Designer), общее ознакомление с работой внутри среды.

Delta Design выделяется способностью импортировать посадочные места компонентов, что сохраняет ценные данные предприятий при миграции с других САПР, хотя в случае с P-CAD потребуются доработка 3D-модели компонента непосредственно в самой программе. Работа с образмериванием чертежей настроена под российские стандарты, что делает использование этой САПР удобнее по сравнению с иностранными аналогами. Кроме того, программа отличается простотой в освоении и использовании, при небольших затратах времени опытный специалист относительно в короткий срок сможет пользоваться данной системой не хуже, чем с зарубежными аналогами; инструменты проверки печатной платы на ошибки более обширны, чем у западных аналогов, что позволит избежать множества ошибок, помимо этого, благодаря возможности проведения оптимизации цепей по импедансу трассировка в данной среде качественно может позволить улучшить качество печатной платы; в отличие от того же P-CAD есть возможность создания полноценной 3D-сборки печатного узла, а также дальнейшей его проверки на тепловые, схемотехнические параметры, а также возможность передачи этой сборки в другие САПР-системы, такие как T-FLEX CAD, КОМПАС 3D (для дальнейшей разработки в составе блоков), и в Ansys для более глубоких исследований узла; внутри программы есть возможность командной работы, что может позволить ускорить разработку продукта, разделив его на части между пользователями, а также ускорить проверку по типу аннотирования замечаний внутри продукта; также важным преимуществом является то, что данный продукт не имеет рисков потери связи с внешней поддержкой продукта, т.е. несмотря на внешнюю политическую ситуацию, продукт будет развиваться, иметь обратную связь и техническую поддержку.

После тестирования системы Delta Design были обнаружены некоторые ограничения: отсутствует функция взаимодействия с эскизами, подлежащими доработке (в условиях производства часто возникает необходимость создать эскиз непосредственно в среде программы, где, например, можно заменить резистор, установив его на панель, и отвести провода к нужным контактным площадкам); неочевидность точки привязки компонента (иногда требуется ручная корректировка координат); если компонент взят из другой среды (P-CAD, Altium Designer), требуется ручная доработка модели; слишком детализированная система настройки правил проектирования; ограниченная обратная совместимость в работе со старыми проектами (могут появиться ошибки в настройках).

По итогам всестороннего изучения системы Delta Design можно заключить, что эта САПР, несмотря на выявленные недостатки, спо-

собна стать полноценной заменой иностранным аналогам и предложить пользователям эффективное решение для проектировочных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ о национальных целях развития России до 2030 года. Президент России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/63728>, свободный (дата обращения: 08.03.2025).

2. Система автоматизированного проектирования электронных устройств на базе печатных плат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ascon.ru/products/delta-design/>, свободный (дата обращения: 08.03.2025).

УДК 621.396

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВОГО ФИЛЬТРА

Е.М. Ивашкина, студентка

*Научный руководитель И.С. Бобылкин, доцент каф. КИПР, к.т.н.
г. Воронеж, Воронежский государственный
технический университет, bobyln@bk.ru, katya.ivashkina@yandex.ru*

Разработка микрополоскового фильтра для приемного устройства основана на технологии микрополосковой линии, применяемой в качестве линии передачи для электромагнитных волн в диэлектрической среде. Был произведен эксперимент, в ходе которого были спроектированы и произведены два фильтра, а также проведено сравнение двух диэлектриков.

Ключевые слова: микрополосковые фильтры, СВЧ, микрополосковые линии.

Главной задачей проекта было проектирование и производство микрополоскового фильтра, а также проведение анализа наиболее подходящего материала для производства.

Результаты работы. Для модуля приёмника нужно было создать фильтр в виде печатной платы. Его разработка и проектирование основаны на технологии микрополосковой линии, применяемой в качестве линии передачи для электромагнитных волн в диэлектрической среде [1].

Были созданы две схемы с разным количеством микрополосковых элементов для определения наиболее подходящего материала по электрическим характеристикам.

Далее контур фильтра (рис. 1) преобразовывается в печатный рисунок на печатной плате с помощью программы Altium Designer.

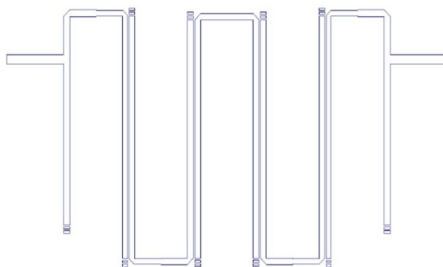


Рис. 1. Контур микрополоскового рисунка

После чего спроектированная плата изготавливается на стороннем предприятии с заполнением бланка заказа и указанием основных требований на производство платы. В ходе работы были выбраны диэлектрики г4003с и г300с.

Для проверки качества изготовления фильтров были проведены измерения размеров проводников и расстояний между ними с использованием микроскопа (рис. 2).

Результаты измерений представлены в таблице с девятью микрополосковыми элементами и с одиннадцатью.

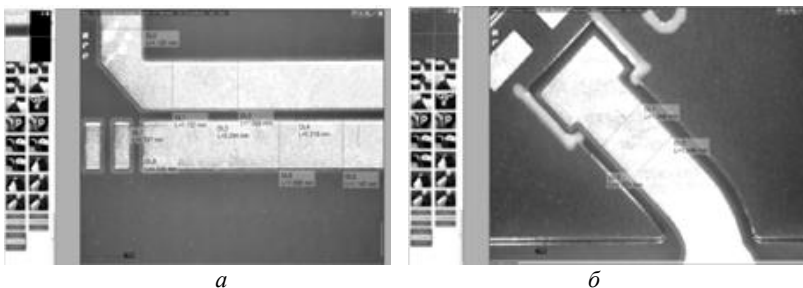


Рис. 2. Измерение ширины проводника и зазора у микрополоскового фильтра: *а* – с девятью полосками; *б* – с одиннадцатью полосками

Величины зазора и ширины проводников фильтров

Част. фильтра, Гц	Зазор № 1	Зазор № 2	Ср. вел. зазора	Шир. проводн. № 1	Шир. про- водн. № 2	Шир. про- водн. № 3	Ср. вел. Проводн.
№ 1							
800–1000	0,237	0,166	0,202	0,864	0,857	0,921	0,861
1000–1300	0,147	0,218	0,183	0,601	0,595	0,627	0,598
1300–1600	0,23	0,154	0,192	0,806	0,774	–	0,790
1600–2000	0,147	0,198	0,173	0,627	0,582	0,646	0,605

№ 2							
800–1000	0,307	0,301	0,304	0,985	0,966	–	0,976
1000–1300	0,352	0,339	0,346	0,742	0,749	0,832	0,746
1300–1600	0,256	0,256	0,256	0,947	0,953	0,979	0,950
1600–2000	0,326	0,313	0,320	0,819	0,825	–	0,822

Анализ полученных результатов. Печатные платы имеют пятый класс точности, потому что расстояние между проводниками составляет менее 0,15 мм. Небольшие расхождения в полученных данных могут быть вызваны человеческим фактором при измерении с помощью микроскопа

В результате всех проведенных экспериментов был выбран наиболее подходящий материал R4003C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитина М.И. Система проектирования микрополосковых полосно-пропускающих фильтров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Красноярск, 1998. – 21 с.

УДК 621.3.049.77

СИНТЕЗ ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ LDPC-ДЕКОДЕРА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА NORMALIZED MIN-SUM

Д.А. Пичугин, инж.-электроник ООО «ЛЭМЗ-Т»

Научные руководители: Н.Г. Зайцев, преп. каф. КИПР, к.т.н.;

Н.Н. Кривин, зав. каф. КИПР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, d4nil.pichugin@yandex.ru

Представлены результаты моделирования цифровой радиосистемы с использованием помехоустойчивых низкоплотностных кодов и синтезированной программной модели LDPC-декодера в программном обеспечении MatLab. Произведена верификация полученных результатов на основе расчёта коэффициента корреляции Пирсона.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, радиосвязь, низкоплотностные коды, моделирование.

Повышение помехоустойчивости радиосистемы является актуальной задачей, так как к современным системам радиосвязи предъявляются требования высоконадежной передачи данных. Одним из способов повышения помехоустойчивости является использование помехоустойчивых кодов, которые позволяют повысить достоверность передаваемой информации за счёт введения избыточности в исходные данные. Среди помехоустойчивых кодов широкое распространение в

последние годы получили коды с малой плотностью проверок на чётность (Low Density Parity Check (LDPC)) [1]. Данные коды позволяют приблизиться к границе Шеннона, которая характеризует максимальную пропускную способность канала при заданном уровне соотношения сигнал/шум.

Целью данной работы является разработка модели LDPC-декодера на основе алгоритма normalized min-sum (NMS) с использованием программного обеспечения MatLab.

В основе алгоритма NMS используется итеративный алгоритм с распространением доверия (belief propagation, BP), предложенный Галлагером в своей диссертации [2]. Суть алгоритма заключается в итеративном пересчете значений вероятности принятых символов для вершин графа Таннера (рис. 1, а), который строится на основе проверочной матрицы кода $\mathbf{H}$. В качестве метрик в алгоритме используются значения логарифмического отношения правдоподобия (LLR – log likelihood ratio) $L(c_i)$.

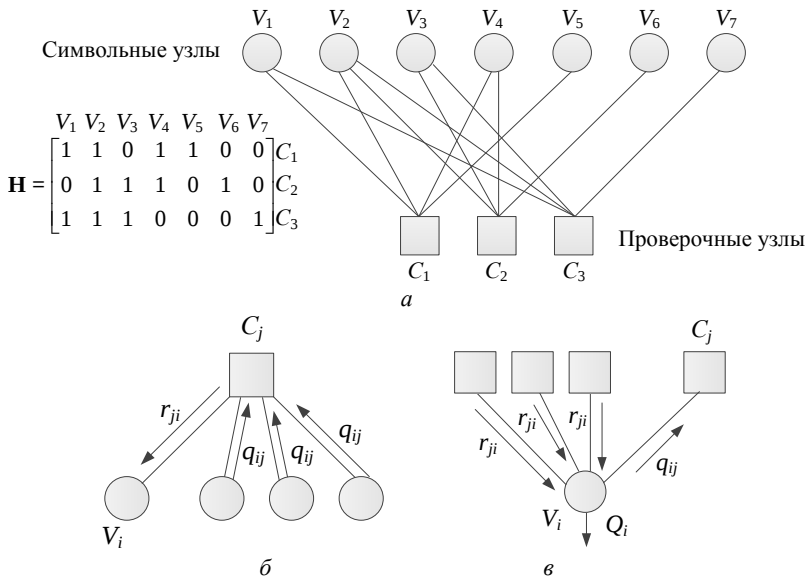


Рис. 1. Пояснение математических операции LDPC-декодирования: граф Таннера (а), операция вертикального шага (б) и операция горизонтального шага (в)

В алгоритме NMS применяются две операции: процедура вертикального (1) и горизонтального (2) шагов (см. рис. 1, б, в), которые описываются следующими математическими выражениями:

$$L(q_{ij}) = L(c_i) + \sum_{j \in C_i \setminus j} L(r_{ji}), \quad (1)$$

$$L(r_{ji}) = \alpha \cdot \min |L(q_{ij})| \cdot \left[\prod_{i \in V_j / i} \text{sign}(q_{ij}) \right], \quad (2)$$

где α – коэффициент нормализации.

Структурная схема модели, с помощью которой осуществлялась проверка синтезированной программной модели LDPC-декодера, представлена на рис. 2.

За основу в качестве параметров LDPC-кодов были взяты значения, определенные в стандарте WiMAX (IEEE 802.16): $n = 2304$ (длина кодового слова), $k = 1920$ (полезная нагрузка), $R = 5/6$ (кодированная скорость), $N_{\text{maxiter}} = 15$ (предельное количество итераций). Для моделирования шумов используется канал с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ), который формирует шумовой сигнал на основе заданного битового соотношения сигнал/шум E_b/N_0 . Демодулятор QPSK формирует метрики LLR. Результаты моделирования представлены на рис. 3 в виде графиков зависимости коэффициента битовых ошибок BER от битового соотношения сигнал/шум E_b/N_0 .

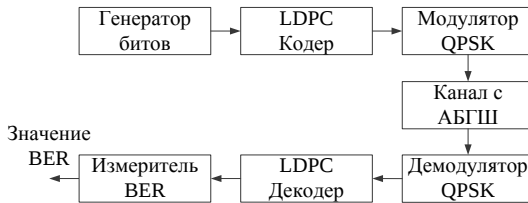


Рис. 2. Структурная схема модели цифровой радиосистемы

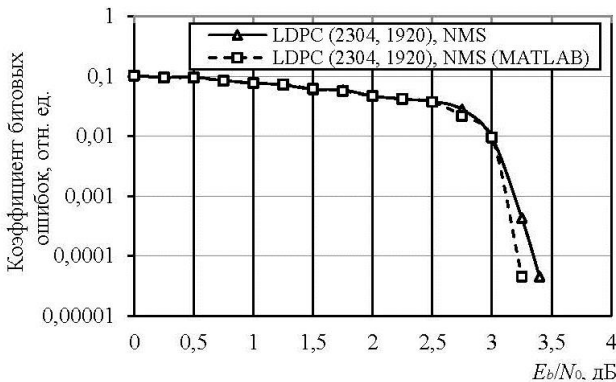


Рис. 3. График зависимости коэффициента битовых ошибок от битового соотношения сигнал/шум

Для верификации синтезированной программной модели LDPC-декодера была смоделирована программная модель LDPC-декодера, реализованная встроенными функциями программного обеспечения MatLab. Для оценки корреляции результатов был рассчитан коэффициент корреляции Пирсона r_R (таблица), который рассчитывается по формуле:

$$r_R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}}.$$

Результаты моделирования

E_b/N_0 , дБ	BER	BER (MatLab)	$\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$	$\sigma_x \sigma_y$	r_R
0,00	0,10295	0,10264	0,01683	0,01686	0,99869
0,25	0,09592	0,09513			
0,50	0,09687	0,09535			
0,75	0,08446	0,08446			
1,00	0,07747	0,07643			
1,25	0,07148	0,07348			
1,50	0,06041	0,06154			
1,75	0,05881	0,05711			
2,00	0,04700	0,04652			
2,25	0,04136	0,04218			
2,50	0,03797	0,03736			
2,75	0,02779	0,02179			
3,00	0,00941	0,00954			
3,25	0,00043	0,00004			
3,50	0,00004	0,00000			

На основе полученного значения коэффициента корреляции Пирсона ($r_R = 0,99$) можно сделать вывод о том, что полученные результаты моделирования для синтезированной программной модели LDPC-декодера и программной модели MatLab имеют положительную линейную зависимость, что свидетельствует о наличии корреляции результатов.

В дальнейшем на основе полученной программной модели MatLab планируется синтез LDPC-декодера с использованием языков описания аппаратуры HDL на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС).

ЛИТЕРАТУРА

1. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение. – М.: Техносфера, 2005. – 320 с.
2. Gallager R. Low-density parity-check codes // IEEE Transactions on Information Theory. – 1962. – Vol. 8, № 1. – P. 21–28.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Т.Н. Пушкарёв, ст. преп. каф. КИПР

г. Томск, ТУСУР, pushkarev-timur@mail.ru

Исследована причина ошибочных действий инженерно-технического персонала (ИТП) по техническому обслуживанию (ТО) и ремонту воздушных судов (ВС) в Российской Федерации. Предложена концепция устранения первопричин ошибочных действий ИТП по ТО ВС.

Ключевые слова: ИТП ИАС, человеческий фактор.

Одна из важнейших целей современной политики государства – развитие качественных и безопасных транспортных услуг. Для достижения этих целей была разработана Транспортная стратегия до 2030 года с прогнозом на период до 2035 г. Для достижения общей безопасности авиационной транспортной системы (АТС) предъявляются требования – экономичность, эффективность и безопасность. Наибольшую роль в обеспечении безопасности полетов играют специалисты по ТО ВС, входящие в состав ИТП инженерно-авиационной службы (ИАС), которые занимаются подготовкой ВС к полетам, проведением регламентных и других видов работ.

За последние 3 года в Российской Федерации произошло несколько крупных авиационных происшествий по вине ИТП ИАС [1].

Ошибкам при ТО ВС чаще всего способствуют такие факторы, как отсутствие необходимой информации для проведения работ, отсутствие необходимых инструментов и оборудования, конструктивные особенности ВС, сложность выполняемых работ, личностные факторы ИТП, недостаточные компетенции ИТП для выполняемых функций, недостаточный надзор и контроль со стороны авиапредприятия и недостаточное нормативно-правовое обеспечение деятельности гражданской авиации со стороны государства [2].

В современных условиях возрастает важность учета человеческого фактора при техническом обслуживании и ремонте (ТОиР) ВС. Проведя анализ и составив дерево причин (рис. 1.) возникновения нарушений и упущений со стороны ИТП ИАС обнаружена неясность формулировок в Приказе Министерства транспорта Российской Федерации от 12.09.2008 г. № 147, регулирующего требования к образованию, для получения квалификационных отметок специалиста по ТО ВС [3].

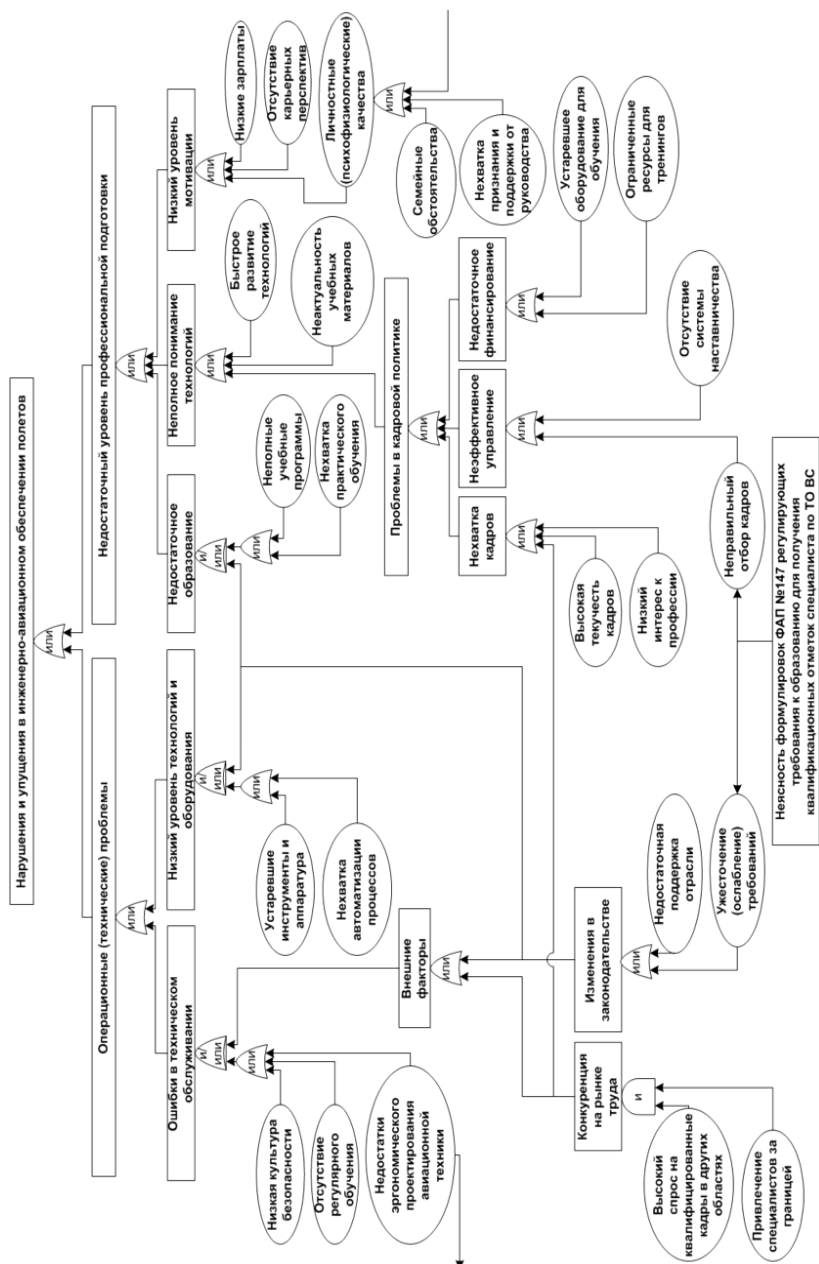


Рис. 1. Дерево причин возникновения ошибок и упущений ИТП ИАС

Проблема заключается в несоответствии нормативно-правовых условий получения квалификационных отметок специалиста по ТО ВС и фактически необходимых компетенций для выполняемых функций. Основным недостатком является отсутствие требований к профилю образования. Сложно представить, что отсутствие технического образования позволит освоить ТО ВС за короткие сроки, причем не только легких ВС, но и магистральных, задействованных для перевозки пассажиров.

Таким образом, необходимо разработать систему обоснованных рекомендаций по совершенствованию действующих требований к специалистам по ТО ВС, утвержденных Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 12.09.2008 г. № 147, регулирующего требования к образованию для получения квалификационных отметок специалиста по ТО ВС.

Концепция решения проблемы предлагает внести изменения в действующую редакцию Приказа Министерства транспорта Российской Федерации от 12.09.2008 г. № 147 в п. 17.9, подпункты а–в, д, внести требования о наличии обязательного высшего технического образования, а также в зависимости от сложности выполняемых функций указать необходимый уровень высшего образования (базовое высшее, специализированное высшее, профессиональное высшее).

В результате проделанного анализа выявлена необходимость совершенствования существующих нормативных правовых основ получения квалификационных отметок специалиста по ТО ВС. Проанализирована проблема неясности формулировок соответствующих нормативных актов. Разработана система обоснованных рекомендаций по совершенствованию действующих требований к специалистам по ТО ВС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Межгосударственный авиационный комитет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mak-iac.org/>, свободный (дата обращения: 05.02.2025).
2. Смирнов Н.Н. Современные проблемы технической эксплуатации воздушных судов / Н.Н. Смирнов, Ю.М. Чинючин. – Ч. II: учеб. пособие. – М.: МГТУ ГА, 2008. – 96 с.
3. Приказ Минтранса РФ от 12.09.2008 г. № 147 об утверждении федеральных авиационных правил «Требования к членам экипажа воздушных судов, специалистам по техническому обслуживанию воздушных судов и сотрудникам по обеспечению полетов (полетным диспетчерам) гражданской авиации».

**АЛГОРИТМ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА НЕИСПРАВНОСТИ
РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ****Т.Н. Пушкарёв, ст. преп. каф. КИПР***г. Томск, ТУСУР, pushkarev-timur@mail.ru*

На примере функциональной диагностической модели бортового ответчика беспилотного летательного аппарата показан алгоритм для определения места неисправности радиоэлектронного оборудования. Составлена структурная схема этого алгоритма.

Ключевые слова: функциональная диагностическая модель, алгоритм, бортовой ответчик.

В рамках проведения специальной военной операции (СВО) беспилотные летательные аппараты (БПЛА) решают множество задач, таких как разведка, управление огнем и целеуказание, постановка радиопомех, ретрансляция сообщений и данных, доставка грузов.

Ввиду большой наработки часто происходят отказы бортового радиоэлектронного оборудования (РЭО), для оперативного восстановления работоспособного состояния необходимо знать, какой блок перешел в неработоспособное состояние, для чего необходимо провести техническое диагностирование.

В обычных условиях эксплуатации используется сбор, учет и обработка данных об отказах и неисправностях за 1–2 года эксплуатации, в рамках СВО этого времени нет. В сложном РЭО поиск места отказа является трудоемкой процедурой и требует более высокой квалификации инженерно-технического персонала, поэтому на первоначальном этапе эксплуатации предлагается использовать различные аналитические модели [1].

На основе структурной схемы бортового ответчика [2] составим алгоритм определения места отказа с помощью функциональной диагностической модели (ФДМ).

По структурной схеме бортового ответчика строим ориентированный граф ФДМ, изображенный на рис. 1.

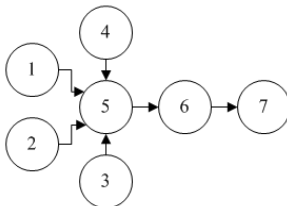


Рис. 1. Ориентированный граф функциональной диагностической модели бортового ответчика БПЛА

По ориентированному графу ФДМ строим матрицу состояний, приведенную на рис. 2, где для каждой строки U_i вычисляется функция предпочтения:

$$W_{2i} = |a - b|, \quad (1)$$

где a – число единиц в строке; b – число нулей в строке.

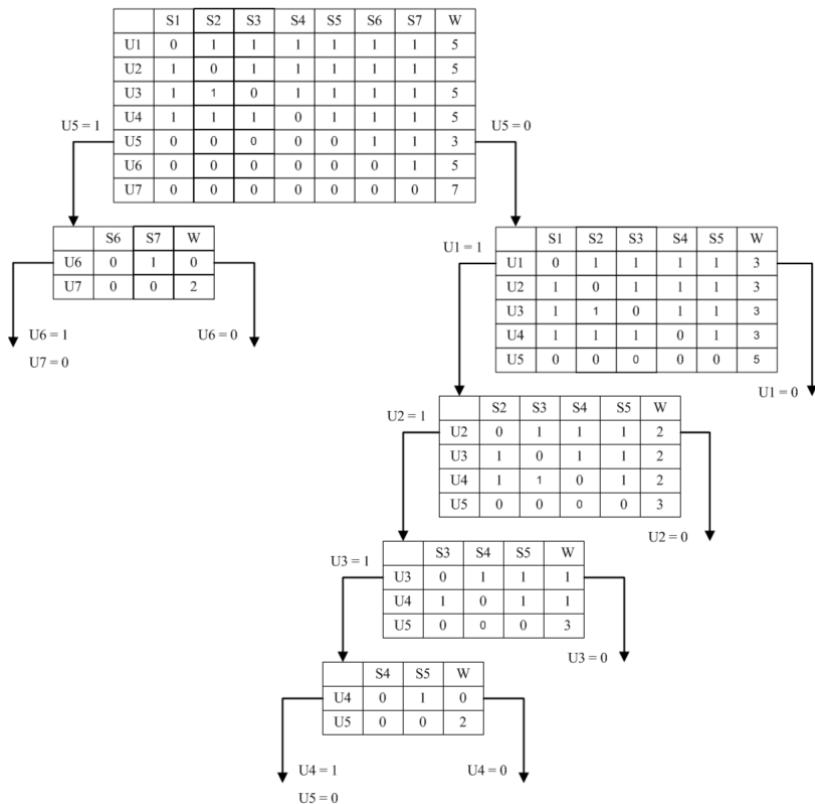


Рис. 2. Матрица состояний, построенная по ориентированному графу функциональной диагностической модели бортового ответчика БПЛА

По окончании построения алгоритма поиска места отказа составляется структурная схема этого алгоритма, приведенная на рис. 3.

Таким образом, предложенный алгоритм позволит на первоначальном этапе эксплуатации бортового РЭО оперативно выявлять место отказа, не требуя высокой квалификации инженерно-технического персонала.

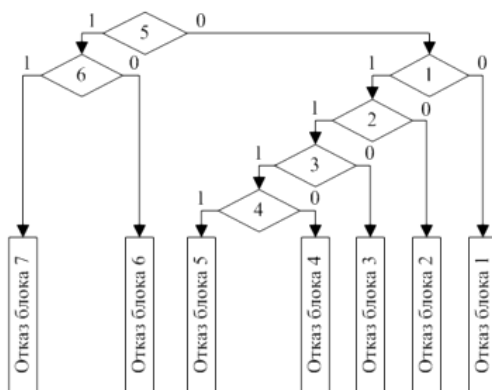


Рис. 3. Структурная схема алгоритма поиска места отказа для бортового ответчика БПЛА

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов В.Г. Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2018. – 133 с.
2. Пушкарёв Т.Н. Идентификация беспилотных летательных аппаратов // Матер. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления»: в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2023. – Ч 1. – С. 18–21.

УДК 629.783

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПАКТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ ДЛЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ МАЛЫХ СПУТНИКОВ

Е.А. Рожкова, студентка

*Научный руководитель А.В. Кустов, доцент каф. ОКМ, к.т.н.
г. Красноярск, СибГУ, e_rozhok@vk.com*

Представлен анализ современных методов проектирования компактных антенных решёток для использования в системах связи малых спутников. Описаны различные типы антенн, такие как патч-антенны, вибраторные антенны, метаматериалы и ММО, с акцентом на их практическое применение, и ограничения, связанные с массой, габаритами и энергопотреблением. Рассмотрено влияние выбора рабочей частоты на характеристики антенной системы. Целью исследования является предоставление всестороннего обзора технологических решений для обеспечения надёжной и эффективной связи с малыми спутниками, способствующих расширению их возможностей в различных областях, от космического мониторинга до связи.

Ключевые слова: антенны, малые спутники, спутниковая связь, бортовые системы связи.

Развитие микро- и наноспутников требует создания эффективных бортовых систем связи. Ограниченные размеры и энергопотребление этих платформ делают традиционные антенны непригодными для использования. Актуальной задачей является разработка компактных антенных решёток, обеспечивающих надёжную связь.

Проектирование таких решёток – ключ к обеспечению связи для малых спутников. Используя несколько антенных элементов, можно добиться высокого усиления, направленности и управления лучом, эффективно направляя сигнал на наземную станцию.

Для реализации компактных решёток используются различные типы антенн, в том числе патч-антенны, отличающиеся низким профилем и простотой конструкции. Они часто объединяются в решётки для усиления сигнала.

Для формирования дополнительных диапазонов работы патч-антенн, как правило, приходится изменять конструкцию проводящих пластин – формировать в них диэлектрические участки. Недостатком такого изменения конструкции является понижение КПД антенны, а также искажения диаграмм направленности.

Другой особенностью патч-антенн является то, что для излучения возможно использование нескольких мод радиоволн, как показано в работе [1]. Благодаря применению нескольких мод радиоволн удастся обеспечить управление характеристиками диаграмм направленности. Благодаря таким возможностям патч-антенны имеют широкие возможности применения в задачах связи.

Для питания антенны используется коаксиальная линия питания, что позволяет расширить возможный рабочий диапазон, поэтому удастся сформировать четырехдиапазонную антенну, причем для переключения диапазонов требуется выполнить коммутацию слоев метаматериала [2].

Примером применения являются многочисленные миссии CubeSat, где для связи с Землёй часто используются массивы патч-антенн. Однако стоит отметить, что патч-антенны, как правило, имеют сравнительно узкую полосу пропускания, что может ограничивать скорость передачи данных.

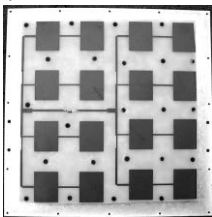


Рис. 1. Матрица 4×4 элементов патч-антенны 2,4 ГГц

Альтернативным вариантом являются вибраторные антенны. Они более сложны в изготовлении, но могут обеспечить более широкую полосу пропускания и более высокое усиление по сравнению с патч-антеннами. Компания Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL), один из лидеров в области малых спутников, использует различные варианты вибраторных антенн в своих разработках. Но стоит учитывать, что эти антенны более чувствительны к внешним воздействиям и требуют более точного расчёта параметров при проектировании.

В дополнение к этому стоит отметить, что в [3] подчёркивается особая важность согласования вибраторных антенн с фидерной линией для достижения максимальной эффективности передачи энергии. Неправильное согласование может привести к существенным потерям мощности и снижению дальности связи. Более того, как указано в [3], вибраторные антенны могут быть выполнены в различных вариантах, включая полуволновые и укороченные диполи, каждый из которых имеет свои особенности и подходит для различных применений. Использование укороченных диполей, например, позволяет уменьшить габариты антенны, но может привести к снижению ее эффективности, что требует тщательного анализа компромиссных решений при проектировании антенной системы для малых спутников.

Антенны на основе метаматериалов обладают уникальными электромагнитными свойствами и необычными характеристиками, включая сверхкомпактность и широкую полосу пропускания.

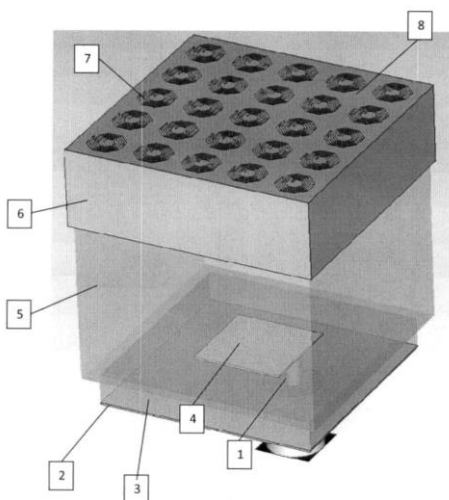


Рис. 2. Трехмерное изображение малогабаритной СВЧ-антенны на основе метаматериала

На рис. 2 представлена схема малогабаритной СВЧ-антенны на основе метаматериала. Ее компоненты включают: фидерную линию – 1, металлический экран – 2, диэлектрическую подложку – 3, металлическую накладку – 4, диэлектрическую опору – 5, диэлектрическое основание слоистой структуры метаматериала – 6, токопроводящий элемент резонансной структуры – 7 и слой резонансной структуры – 8. Более подробное описание конструкции антенны можно найти в патенте [4].

Метаматериалы представляют собой сложные композитные структуры, свойства которых определяются не столько материалом, из которого они сделаны, сколько специально разработанной периодической конфигурацией макроскопических элементов. Эта концепция подробно описана в источнике [5]. Такая периодичность позволяет целенаправленно изменять диэлектрические и магнитные характеристики материала.

Применение метаматериалов является многообещающим направлением в СВЧ-технологиях. Хотя полный потенциал этой технологии еще предстоит реализовать, использование искусственных структур с уникальными электродинамическими свойствами открывает возможности для создания СВЧ-устройств и антенн с характеристиками, которых сложно достичь традиционными методами. Обзор современных тенденций в этой области представлен в работе [6].

Технология ММО, как показано в исследовании [7], обеспечивая повышение пропускной способности за счёт пространственного мультиплексирования и снижение помех за счёт разнесения антенн. Пространственное мультиплексирование позволяет передавать несколько потоков данных параллельно, а разнесение антенн подавляет помехи, особенно при плотной группировке спутников.

Несмотря на сложности, разработка эффективных антенных систем для малых спутников является перспективной задачей. Применение различных типов антенных решёток и оптимизированный выбор рабочей частоты позволят создать более мощные и надёжные системы связи, расширяя возможности малых спутников. Дальнейшие исследования в этой области крайне важны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Многодиапазонная патч-антенна на основе активного метаматериала / Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Фёдоров // Вестник ВГТУ. – 2022. – № 3.
2. Single-layer single-patch dual-band and triple-band patch antennas / W.C. Mok, S.H. Wong, K.M. Luk, K.F. Lee // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 61, No. 8. – P. 4341–4344.
3. Войтович Н.И. УКВ-вибраторные антенны: учеб. пособие / Н.И. Войтович, А.В. Ершов, А.Н. Соколов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 85 с.

4. Пат. 2 473 157 РФ, МПК H01Q 9/00. Малогабаритная СВЧ-антенна на основе метаматериала / В.Г. Веселаго (РФ), А.А. Жуков (РФ), И.Ю. Бредихин (РФ), А.А. Аджибеков (РФ), В.И. Гольякова (РФ). – № 2011146626 / 08; заявл. 17.11.2011; опубл. 20.04.2013. Бюл. № 2. – 16 с.

5. Вендик И.Б. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот / И.Б. Вендик, О.Г. Вендик // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83, вып. 1. – С. 3–28.

6. Авдюшин А.С. Применение метаматериалов в антенной технике / А.С. Авдюшин, М.Ю. Власов, Ю.Г. Пастернак // Вестник ВГТУ. – 2013. – № 3-1.

7. Springer Open. Многоспутниковые ММО-коммуникации в Кудиапазоне и выше: исследования пространственного мультиплексирования для повышения пропускной способности и разнообразия выбора для снижения помех [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://jwcp-eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1155/2007/59608> (дата обращения: 01.02.2025).

УДК 621.396.969.3

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БОРТОВОГО РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В СИСТЕМАХ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

Е.А. Рожкова, студентка

*Научный руководитель А.В. Кустов, доцент каф. ОКМ, к.т.н.
г. Красноярск, СибГУ, e_rozhok@vk.com*

Проведено исследование бортового радиотехнического комплекса (БРТК) как ключевого элемента систем спутниковой навигации. Рассматриваются вопросы структуры БРТК, производственных аспектов, влияния космической среды и методов повышения надежности. Подчеркивается важность оптимизации БРТК для обеспечения качественных навигационных услуг.

Ключевые слова: бортовой радиотехнический комплекс, спутниковая навигация, космические системы, надежность, передача данных.

Бортовой радиотехнический комплекс (БРТК) является неотъемлемой частью любого навигационного спутника, обеспечивая генерацию, передачу и приём навигационных сигналов. Качество этих сигналов, их точность и стабильность напрямую влияют на производительность всей системы спутниковой навигации (ССН).

БРТК является «сердцем» любого навигационного спутника. Он отвечает за генерацию, усиление, передачу и приём навигационных сигналов, которые используются приёмниками на Земле для определения местоположения, скорости и точного времени. БРТК используется во всех современных глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС), таких как:

– GPS (Глобальная система позиционирования): американская система, состоящая из множества спутников, работающих на разных орбитах.

– ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система): российская система, аналогичная GPS. Согласно данным, представленным на сайте [1], точность позиционирования сопоставима с точностью GPS, однако в определенных регионах она может быть даже выше из-за особенностей орбитальной группировки.

– Galileo: европейская система, которая отличается повышенной точностью и надежностью.

– BeiDou: китайская система, активно развивающаяся и покрывающая значительную часть территории Земли.

– IRNSS (NavIC): индийская региональная навигационная спутниковая система.

Типичная структура БРТК включает в себя несколько ключевых компонентов:

– генератор навигационных сигналов, отвечающий за формирование точных несущих частот и кодовых последовательностей, необходимых для навигации;

– усилители мощности усиливают навигационные сигналы для передачи на Землю, обеспечивая необходимую мощность с минимальными искажениями;

– антенная система обеспечивает излучение и приём радиосигналов, обладая соответствующими диаграммами направленности для надёжной связи;

– приёмники принимают и обрабатывают сигналы от наземных станций управления для корректировки траектории спутника и калибровки БРТК, причём эти приёмники могут быть в том числе лазерными, как указано в [2];

– синхронизаторы времени (часы), как правило, атомные, обеспечивают точное время для работы всей системы;

– система управления и контроля отвечает за мониторинг работы всех компонентов БРТК, контроль режимов работы и управление параметрами;

– электропитание обеспечивает стабильное питание всех компонентов БРТК;

– модуль обработки сигналов принимает и обрабатывает поступающие данные для коррекции и повышения точности.

Производство БРТК – высокотехнологичная и дорогостоящая отрасль, сосредоточенная в нескольких странах с развитым космическим сектором. К основным производителям относятся компании из

США (например, Lockheed Martin, Boeing, Raytheon), России («Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва), а также европейские компании, входящие в консорциум Galileo, китайские (China Aerospace Science and Technology Corporation (CASC)) и индийские (ISRO). При этом в России есть и другие производители отдельных компонентов, например, те, кто разрабатывает пассивные водородные стандарты частоты [3], что подчеркивает важность отечественных разработок. Зачастую производство БРТК является результатом международного сотрудничества с привлечением различных специалистов и ресурсов.

В космическом пространстве БРТК подвергается воздействию множества факторов, которые могут повлиять на его надёжность и производительность. К ним относятся радиация, вызывающая повреждения электронных компонентов; температурные колебания, приводящие к деформации; вакуум, вызывающий испарение материалов; механические нагрузки при запуске и от космического мусора, а также сбои в программном обеспечении. Для обеспечения надёжной работы БРТК в условиях космической среды применяются различные методы. Используются радиационно стойкая электроника, а также системы терморегулирования для поддержания стабильной температуры.

Ключевые компоненты резервируются, обеспечивая дублирование в случае отказа. Отказоустойчивое программное обеспечение способно обнаруживать и исправлять ошибки. Кроме того, на всех этапах сборки и тестирования БРТК проводится строгий контроль качества, а также всесторонние испытания в условиях, имитирующих космическую среду. Согласно [4], для повышения надёжности БРТК также применяются методы резервирования, автоматической диагностики и контроля исправности. Особое внимание уделяется повышению точности и стабильности частотно-временного обеспечения, поскольку это критически важно для навигационных систем.

Помимо уже рассмотренных аспектов, хочется также подчеркнуть, что эффективность БРТК в спутниках напрямую зависит от того, насколько точно он способен генерировать и передавать навигационные сигналы. Здесь важно отметить, что речь идёт не только о точности самих сигналов, но и о стабильности их работы в течение всего срока службы спутника. Ведь если спутник регулярно теряет сигнал или передаёт его с искажениями, то вся навигационная система может просто «захлебнуться». Поэтому инженеры постоянно работают над повышением точности и стабильности частотно-временного обеспечения БРТК, а также над применением новых алгоритмов обработки сигнала. Важно, чтобы эти алгоритмы были не только эффективными, но и устойчивыми к различным помехам, как преднамеренным, так и

природным, и тем самым повышали надёжность системы в целом. Именно постоянное стремление к улучшению этих характеристик является залогом успешной работы спутниковой навигации.

В заключение отметим, что бортовой радиотехнический комплекс играет ключевую роль в функционировании систем спутниковой навигации. Понимание его структуры, производственных аспектов, условий эксплуатации и методов повышения надёжности, а также учёт специфики различных систем и технологий необходимы для обеспечения точности, надёжности и доступности навигационных услуг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прикладной потребительский центр Госкорпорации «Роскосмос». Точность и надёжность навигации по сигналам новых спутников ГЛОНАСС обеспечивают бортовые радиотехнические комплексы РКС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://glonass-iac.ru/news/gnss/3238/> (дата обращения: 02.02.2025).
2. Карпам И.Н. Особенности наведения бортовых лазерных приборов космической радионавигационной системы ГЛОНАСС / И.Н. Карпам, Е.С. Жукова, С.В. Литошик // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2010. – № 3.
3. Пат. 120077 РФ, МПК В64D 45/04. Бортовой радиотехнический комплекс навигации и посадки летательных аппаратов морского базирования / В.И. Бабуров (РФ), М.А. Велькович (РФ), А.Г. Герчиков (РФ), С.П. Федотов (РФ), Ю.Г. Шатраков (РФ), В.П. Жихарев (РФ). – № 2012118927 / 11; заявл. 05.05.2012; опубл. 10.09.2012. Бюл. № 25. – 2 с.
4. Эшмурадов Д.Э. Методы совершенствования надёжности радионавигационных систем / Д.Э. Эшмурадов, М.О. Ёдгорова, Б.А. Жумамуратов // Теория и практика современной науки. – 2023. – № 1 (91).

УДК 629.06+159.91

ПРИМЕНЕНИЕ НОСИМОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СНА ЗА РУЛЁМ МОТОЦИКЛА

Д.А. Шелягин, студент каф. КИПР

Научный руководитель Н.Н. Кривин, зав. каф. КИПР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, sheldanx@gmail.com

Рассмотрены проблемы, связанные со сном водителей за рулём мотоцикла, представлены методы борьбы со сном во время дальних поездок при помощи внедрения электроники в мотоэкипировку и техническое решение, реализующее эти методы.

Ключевые слова: носимая электроника, мотоэкипировка, мотоцикл, шлем, усталость, психофизиология.

Такой вид транспорта, как мотоцикл, стал достаточно удобным и мобильным, чтобы передвигаться на нём на дальние расстояния. И тем не менее в этом есть свои проблемы: длительные поездки заставляют водителя уставать, теряется внимание, уменьшается скорость реакции, появляется сонливость. Из-за этого мотоциклист может попасть в аварию, которая может стать для него последней.

Существуют стандартные методы борьбы со сном: выпить тонизирующий напиток, сделать зарядку, включить музыку и т.д. Естественно, лучшее решение в данной ситуации – это остановиться и поддаться сну, тогда организм отдохнёт, и мотоциклист сможет вновь контролировать транспорт. Однако по разным причинам не всегда возможны остановки на долгое время, поэтому необходимо создать устройство, позволяющее эффективно бороться со сном без перерывов на отдых.

Это устройство не должно мешать во время обычного вождения, при этом обязано срабатывать именно в тот момент, когда мотоциклист начинает впадать в сон; должно быть внедрено в уже существующую экипировку и не создавать опасных ситуаций.

Для таких задач возможно применение электроники, встроенной в экипировку, т.е. носимой электроники. Она способна регистрировать различные физиологические процессы, благодаря чему появляется возможность отслеживать состояние человека. Для определения активности работы нервной системы используется электрическая активность кожи (ЭАК) [2]. Во время бодрствования организм выделяет пот, из-за чего сопротивление кожи (СК) относительно мало, но в период засыпания работа потовых желёз уменьшается, поэтому СК становится высоким. В качестве «будильника» целесообразно будет использовать средне- или высокочастотный звук, так как он способен создать раздражение и вывести из сна, а также будет выделяться из шума.

Исходя из методов решения задач, предлагается создать мотоциклетный шлем, содержащий в себе систему отслеживания ЭАК и систему предотвращения сна. Наиболее безопасным и удобным для реализации решением будет взять за основу шлем типа интеграл, который защищает все части головы [3]. Для отслеживания потребуются электроды, которые можно установить в лобовой части шлема, а для предотвращения сна можно использовать пьезодинамики или прочие источники звука, управляемые электрическими сигналами. Питаться устройство будет литий-железо-фосфатный аккумулятор, так как он не является взрывоопасным, что будет делать итоговое устройство безопасным в случае его повреждения [4].

Следует отметить, что у данного устройства есть аналоги, которые используются для автомобилистов. Однако эти решения в большинстве своём требуют открытых частей тела и дополнительного оборудования, установленного в транспорте, что сложно реализуемо в рамках управления мотоциклом.

В будущем стоит разработать иные методы определения усталости и сонливости, желательно бесконтактные, которые можно внедрить в мотоэкипировку, также имеет смысл создать другие датчики и устройства носимой электроники, облегчающие поездку и оберегающие жизнь мотоциклиста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Как не заснуть за рулем мотоцикла в пути [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.partner-moto.ru/blog/kak-ne-zasnut-za-rulem-mototsikla-v-puti>, свободный (дата обращения: 10.03.2025).

2. Электрическая активность кожи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Электрическая_активность_кожи, свободный (дата обращения: 10.03.2025).

3. Почему большинство мотоциклистов выбирает мотошлемы-интегралы? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ekipka.ru/articles/pochemu_bolshinstvo_mototsiklistov_vybiraet_motoshlemy_integraly/?ysclid=m8371x3n63377231279, свободный (дата обращения: 10.03.2025).

4. Литий-железо-фосфатный аккумулятор – Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Литий-железо-фосфатный_аккумулятор, свободный (дата обращения: 10.03.2025).

УДК 53.087.45/621.37/39

СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО МОНИТОРИНГА РАДИОСРЕДСТВ СЕРИИ «ФАЗАН-19»

Н.И. Тарасов, студент каф. КИПР

Научный руководитель Н.Н. Кривин, зав. каф. КИПР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, n.i.tarasov@inbox.ru

Представлена разработанная автором система мониторинга технического состояния радиосредств серии «Фазан-19» для авиационной отрасли и центров обслуживания воздушного движения РФ.

Ключевые слова: радиоэлектронное устройство, оповещение, обслуживание воздушного движения, работоспособное состояние, функциональный узел, интерфейс RS-485, мониторинг, техническая эксплуатация, средство связи.

Для обеспечения непрерывного функционирования основных объектов узла технической эксплуатации (ТЭ) систем и средств авто-

матизации управления воздушным движением (УВД) Красноярского Центра организации воздушного движения (ОВД) необходимо осуществлять мониторинг основных систем и средств УВД аэродромного диспетчерского центра ЕС ОрВД непосредственно на рабочем месте сменного инженера. Количество работников на рабочем месте варьирует от двух до четырех, в зависимости от дня недели. Очевидно, что в определенный момент времени число рабочих задач сменного инженера может превышать допустимые нормы [1].

В настоящее время почти все основные системы находятся под непрерывным мониторингом сменного инженера с его рабочего места. Исключением являются только средства серии «Фазан-19»: радиостанция «Фазан-19Р5» и радиоприемник «Фазан-19ПРМ». В общей сложности на объекте их расположено 22 и все они находятся в линейно-аппаратном зале (ЛАЗ). «Фазан-19Р5» предназначена для приемапередачи речевой информации в каналах авиационной подвижной связи и может использоваться для работы в совмещённых и разнесённых радиоцентрах, в составе ретрансляторов и автономно.

В случае отказа одного из основных радиоприемников оперативно об этом не узнает ни сменный инженер, ни диспетчер ОВД. Следовательно, не будет выполнен своевременный переход на резервное радиосредство, произойдёт потеря радиосвязи диспетчера с экипажем воздушного судна, что может привести к авиациденту.

Структурная схема «Фазан-19Р5» представлена на рис. 1 [2].

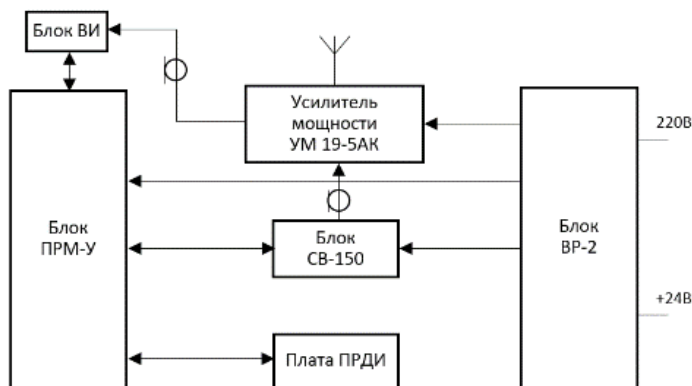


Рис. 1. Структурная схема «Фазан-19Р5»

Основным функциональным блоком приёмника является ПРМ-У, в состав которого входят радиоприемное устройство (ПРМ-СИНТ), плата управления приемопередатчиком (УП), плата клавиатуры и индикации (КИ). Основным источником вывода информации служит

блок внешних интерфейсов (ВИ) – блок вывода на внешние линии передачи с приемопередающего устройства.

В ходе изучения и анализа радиосредств была разработана структурная схема системы мониторинга (рис. 2).

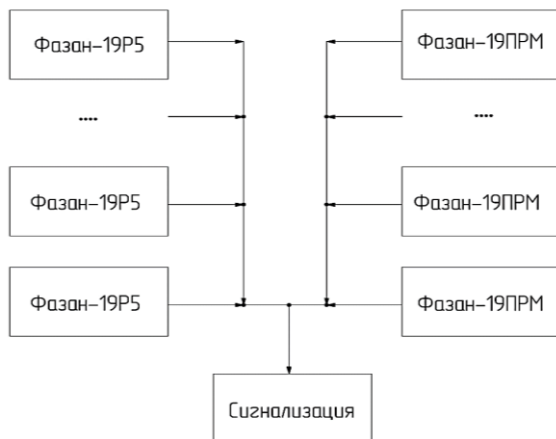


Рис. 2. Структурная схема системы мониторинга

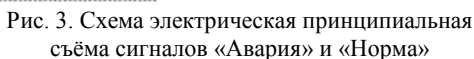
Возможны два основных метода обеспечения мониторинга радиосредств – через интерфейс RS-485 или через внешние физические линии. Был выбран последний вариант, так как он является более простым в исполнении, не требует изучения принципиально новой информации и особых условий ТЭ инженерными работниками.

Основой для сбора и вывода информации является блок ВИ. За вывод информации о состоянии радиосредства отвечает микроконтроллер, открывающий транзисторы Т1 и Т2. Коллекторы транзисторов «Нормы» и «Аварии» выведены на пины № 4 и № 8 разъема DB-25 соответственно, обозначенного «КОНТРОЛЬ». Разработанный способ получения сигналов с радиосредства представлен на рис. 3. U1, U2 – оптроны; 4, 6, 8 – пины.

Выводы с блоков ВИ и П-ВИ с радиосредств «Фазан-19Р5» и «Фазан-19ПРМ» подключаются по отдельности к оптронам. Они, в свою очередь, обеспечивают гальваническую развязку коллекторов транзисторов с блоков П-ВИ и ВИ. Питание обоих оптронов сигналов «Норма» и «Авария» обеспечивается от радиосредства через разъем DB-9М «RS-485» напряжением постоянного тока 24 В.

Для соединения всех радиосредств в одну сеть предложена реализация соединения через кроссовое оборудование – размыкаемые

Ключи отключения радиосредства управляются корпусом. В режиме «Норма» они подключены последовательно: замыкание ключа исключает средство из системы без изменения состояния сигнализации. В режиме «Авария» ключи параллельны и изначально замкнуты: размыкание не влияет на сигнализацию.



Режим «Норма». При закрытии транзистора в блоке ВИ/П-ВИ: увеличивается сопротивление цепи питания диода оптрона, закрывается транзистор VT1, разрывается последовательная цепь на плите, закрывается VT1, гаснет VD3, снимается питание с реле K1, замыкается контакт, активируется зуммер B1.

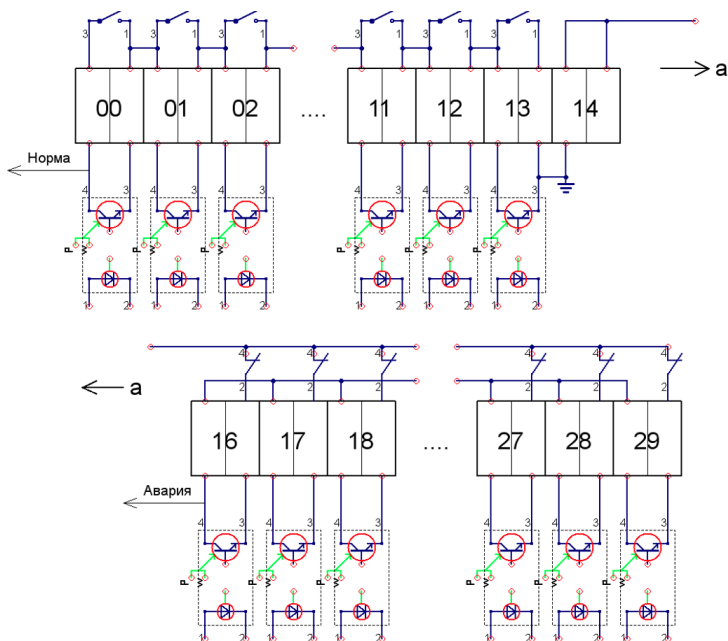


Рис. 4. Схема электрическая функциональная подключения радиосредств через кроссовое оборудование

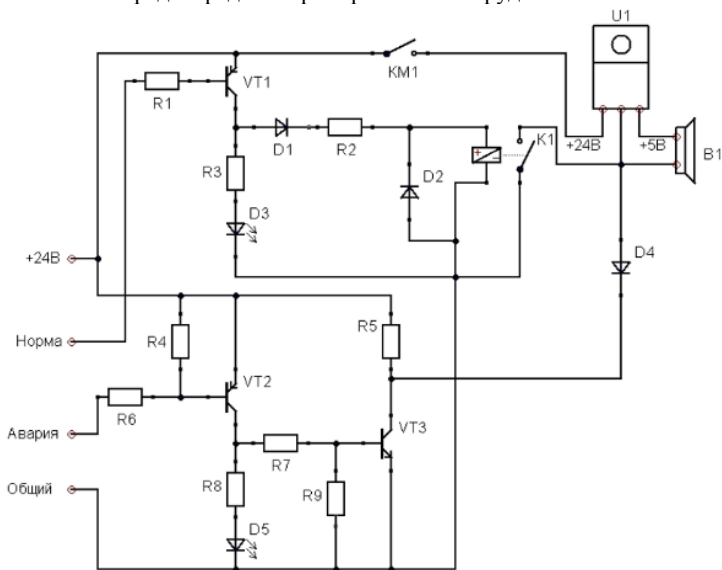


Рис. 5. Схема электрическая принципиальная сигнализации

Режим «Авария». При открытии транзистора в блоке ВИ/П-ВИ: уменьшается сопротивление цепи оптрона, открывается транзистор оптрона, замыкается параллельная цепь на плинте, открывается VT2, загорается D5, сигнал инвертируется VT3, звучит оповещение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приказ Минтранса России от 14.03.2022 г. Должностная инструкция инженера по радионавигации, радиолокации и связи группы технической эксплуатации оборудования систем и средств управления воздушным движением аэродромного диспетчерского центра единой системы организации воздушного движения службы ЭРТОС Красноярского центра ОВД. – М., 2022.

2. Руководство по эксплуатации от 07.06.2006 г.: радиосредства серии «Фазан-19»: ХЖО.110.147 РЭ. – М., 2006.

УДК 623.746.519

РАЗРАБОТКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

К.С. Заврин, Н.В. Тимкин, студенты каф. КИПР

Научный руководитель Н.Н. Кривин, заведующий каф. КИПР, к.т.н.

Проект ГПО КИПР-2303. Разработка многофункционального

беспилотного летательного аппарата

г. Томск, ТУСУР, nikitim02@gmail.com

Представлены результаты разработки многофункционального беспилотного летательного аппарата (БПЛА), предназначенного для выполнения различных задач в условиях умеренно континентального климата. Рассмотрены этапы проектирования, включая подбор комплектующих, разработку электрической принципиальной схемы контроллера двигателей, создание 3D-модели корпуса и математической модели для расчета стабильности взлета. Приведены текущие проблемы конструкции и предложены возможные решения для повышения надежности и функциональности БПЛА.

Ключевые слова: БПЛА, контроллер двигателей, 3D-моделирование, математическая модель, стабильность взлета, климатические условия.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят широкое применение в различных областях, от военной разведки до гражданской доставки грузов. Однако большинство существующих конструкций БПЛА предназначено для выполнения узкоспециализированных задач, что приводит к увеличению эксплуатационных расходов и необходимости замены аппарата при изменении типа задач. Целью данной работы является разработка универсального БПЛА, способно-

го выполнять различные функции без значительных изменений конструкции.

Целью проекта является создание конструктивно простого, технологичного в изготовлении, быстро собираемого и разбираемого БПЛА, способного работать в условиях умеренно континентального климата Западно-Сибирского округа. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Подобрать комплектующие, учитывая климатические условия и технические требования.
2. Разработать электрическую принципиальную схему контроллера двигателей.
3. Спроектировать 3D-модель корпуса БПЛА.
4. Разработать математическую модель для расчета стабильности взлета.
5. Выявить и устранить текущие проблемы конструкции.

На основе анализа климатических условий, технических требований к объекту проектирования и характеристик покупных изделий были выбраны следующие компоненты:

- Двигатель: GARTT ML 5010.
- Аккумулятор: HRB на 22000 mAh.
- Полетный контроллер: FPV SpeedyBee F405 V3 50A BLS 30×30.

Схема электрическая принципиальная контроллера двигателей была разработана с использованием программы EasyEDA. В процессе проектирования были учтены требования к функциональности и совместимости компонентов.

В САПР «КОМПАС-3D» была разработана 3D-модель корпуса, включающая верхнюю и нижнюю части, шасси, корпус аккумуляторной батареи, лучи и крепления двигателей (рис. 1).

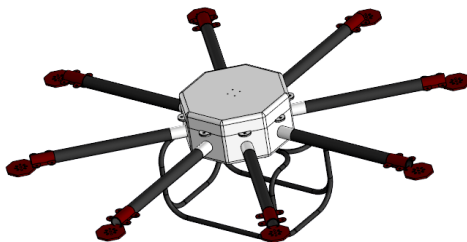


Рис. 1. 3D-модель БПЛА

В программе SimInTech была разработана математическая модель, учитывающая силу тяжести и силу тяги двигателей. Модель позволяет оценить стабильность взлета и удержание высоты.

Были выявлены следующие проблемы:

- Недостаточная надежность крепления верхней части корпуса.
- Отсутствие защиты от влаги и пыли.
- Недостаточный расчет нагрузки на стенки корпуса.
- Наличие пустого пространства в корпусе.
- Отсутствие расчета влияния нагрева аккумуляторов на пластик.

Разработанная конструкция БПЛА позволяет выполнять задачи в условиях умеренно континентального климата. Однако для повышения надежности и функциональности необходимо доработать крепление, добавить защиту от влаги и пыли, а также провести дополнительные расчеты нагрузки и нагрева.

В ходе выполнения проекта были разработаны основные компоненты БПЛА, включая электрическую схему, 3D-модель корпуса и математическую модель для расчета стабильности взлета. Выявленные проблемы конструкции требуют дальнейшей доработки для повышения надежности и функциональности устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12.3.002–2014. Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные. Общие требования безопасности.
2. ГОСТ 2.106–2019. Единая система конструкторской документации. Текстовые документы.
3. ГОСТ 2.109–2019. Единая система конструкторской документации. Основные требования к чертежам.
4. ГОСТ 2.413–2019. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения чертежей изделий машиностроения и приборостроения.
5. ГОСТ 2.417–2019. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения схем.
6. ГОСТ 2.702–2019. Единая система конструкторской документации. Правила выполнения электрических схем.
7. SimInTech: официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://simintech.ru/> (дата обращения: 10.04.2024).
8. КОМПАС-3D: официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://kompas.ru/> (дата обращения: 10.04.2024).
9. EasyEDA: официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://easyeda.com/> (дата обращения: 10.04.2024).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА В ИСПЫТАНИЯХ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Н.К. Монастырёв, студент каф. КИПР;

Л.Ю. Войко, преп. каф. КИПР

*Научный руководитель Н.Н. Кривин, зав. каф. КИПР, к.т.н.
Проект ГПО КИПР-2304. Исследование путей использования
концепции цифровых двойников в вопросах проектирования,
производства и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры
различного назначения*

г. Томск, ТУСУР, nmonastyrev4@gmail.com

Изучена проблема проектирования радиоэлектронных изделий, работающих в условиях неопределенности, и рассматривается концепция цифровых двойников как инструмент для оптимизации и улучшения этих изделий. Предлагается концептуальная модель цифрового двойника радиоэлектронного средства, предназначенная для улучшения его физического двойника.

Ключевые слова: цифровой двойник, радиоэлектронные средства, преобразование, модернизация.

Современная радиоэлектронная аппаратура обладает высокой сложностью и интеграцией, что создает трудности при испытаниях и сертификации из-за ресурсоемкости традиционных методов, их неспособности выявлять скрытые дефекты и анализировать динамическое поведение системы. Проблема усугубляется неполным учетом межкомпонентных взаимодействий, формирующим пробелы в знаниях и ограничивающим оптимизацию процессов. В исследовании предлагается решить эти задачи через внедрение цифровых двойников, позволяющих виртуально моделировать работу систем до и во время реальных испытаний, что повысит их точность и эффективность за счет прогнозирования поведения в динамических условиях.

Цель данной работы заключается в разработке и обосновании методологической базы использования концепции цифрового двойника для испытаний радиоэлектронной аппаратуры, что позволит сократить затраты времени и ресурсов, а также повысить точность диагностики и прогнозирования поведения аппаратных комплексов.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Проанализировать существующие методы испытаний радиоэлектронной аппаратуры и выявить их основные ограничения.

2. Изучить концепцию цифрового двойника и ее возможности в контексте моделирования и испытаний сложных систем.

3. Разработать методологическую схему интеграции цифрового двойника в процесс испытаний радиоэлектронной аппаратуры.

4. Провести сравнительный анализ эффективности традиционных методов и предложенного подхода.

5. Оценить теоретическую и практическую значимость результатов исследования, а также определить направления для дальнейших разработок.

В работе применен комплекс методов, который позволяет всесторонне оценить и протестировать концепцию цифрового двойника в контексте испытаний радиоэлектронной аппаратуры:

- Метод RCA (root cause analysis): используется для выявления первопричин возможных неисправностей в аппаратуре.

- Диверсионный анализ: применяется для оценки устойчивости системы при наличии внешних и внутренних возмущений.

- Методики моделирования бизнес-процессов AS IS и TO BE: позволяют описать текущее состояние испытаний и спроектировать оптимальное будущее состояние с интеграцией цифрового двойника.

- Компьютерное моделирование и симуляция: создаются виртуальные прототипы аппаратуры, что позволяет предварительно оценить их поведение и выявить потенциальные дефекты до проведения реальных испытаний.

В рамках исследования выдвигаются следующие гипотезы:

1. Интеграция цифрового двойника в процесс испытаний радиоэлектронной аппаратуры позволяет выявлять скрытые дефекты и несоответствия на ранних стадиях, что снижает общие затраты на тестирование.

2. Применение цифрового двойника способствует оптимизации процесса испытаний за счет сокращения временных затрат и повышения точности диагностики.

3. Моделирование с использованием цифрового двойника улучшает качество принятия решений при разработке и модернизации радиоэлектронной аппаратуры.

Для проверки гипотез проведено комплексное сравнительное моделирование, в ходе которого результаты испытаний с использованием цифрового двойника сопоставлялись с данными, полученными традиционными методами (рис. 1). Результаты подтвердили, что использование цифрового двойника позволяет существенно повысить точность диагностики и оптимизировать процесс испытаний, что соответствует выдвинутым гипотезам.



Рис. 1. Концептуальная модель РЭС, подлежащей модификации,
на базе цифрового двойника [1]

На основе анализа разработана методологическая схема внедрения цифрового двойника в испытания радиоэлектронной аппаратуры. Основные компоненты решения:

Алгоритм создания цифрового двойника – сбор данных, моделирование, валидация и интеграция со стендами.

Динамическое тестирование – симуляция сценариев эксплуатации в реальном времени для предупреждения отказов.

Инструменты визуализации – оперативный анализ данных для принятия решений.

Практическая ценность – снижение затрат на испытания, повышение надежности систем, оптимизация разработки. Теоретический вклад – расширение концепций испытаний за счет цифрового моделирования. Научная новизна – синтез методов RCA, диверсионного анализа и цифрового моделирования для создания адаптивных испытательных систем.

Таким образом, применение концепции цифрового двойника в испытаниях радиоэлектронной аппаратуры представляет собой перспективное направление, которое позволит значительно повысить эффективность и надежность испытаний, а также станет основой для дальнейших исследований и инноваций в области радиоэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чувашова В.А. Использование концепции цифровых двойников в вопросах улучшения радиоэлектронных средств / В.А. Чувашова, Д.А. Понамарева, Л.Ю. Войко // XIII регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения – 2024»: сб. тр. Томск: ТУСУР, 2024. – С. 378–380.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМОЙ ДЛИТЕЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НА ВЫСОТЕ

В.Н. Федоров, А.Д. Яковенко, студенты каф. КИПР

Научный руководитель И.Л. Артемов, доцент каф. КИПР, к.ф.-м.н.

*Проект ГПО КИПР-2303. Разработка многофункционального
беспилотного летательного аппарата*

г. Томск, ТУСУР, real.illusion42@gmail.com

Представлен обзор системы на основе мультироторного БПЛА, способной длительно удерживать осветительное, вещательное или приемное оборудование, питаюсь от источника сетевого переменного напряжения, описание и некоторые характеристики данной системы.

Ключевые слова: бюджетная автономная платформа, платформа на основе БПЛА, длительное удержание оборудования на высоте.

Развитие беспилотных систем в последние годы идет активно, решая множество проблем человека.

Ранее нами в рамках группового проектного обучения в университете [1] был собран квадрокоптер с упором на замену основных комплектующих бюджетными вариантами – сборка полетного контроллера, батареи, конструктивные изменения рамы. Сборка прошла летные испытания и показала себя достаточно хорошо, что послужило целью дорабатывать бюджетный вариант [2].

Собранная система представляет собой квадрокоптер, самостоятельно поднимающийся на заданную пользователем высоту и длительно удерживающий ее, сохраняя при этом осветительное, радиовещательное, приемное или оборудование для видеонаблюдения.

Представленный прототип состоит из таких элементов:

- а) рама, спроектированная и собранная из фанеры;
- б) преобразователь сетевого напряжения в 12 В бортового;
- в) бесколлекторные моторы типоразмером 2807 и частотой вращения ротора 1300 kV;
- г) двухлопастные винты размером 10 дюймов;
- д) драйверы бесколлекторных моторов – ESC;
- е) полетный контроллер на базе двух микроконтроллеров Atmega328p, включающий датчики и приемник сигналов;
- ж) полезная нагрузка – подвесное осветительное оборудование;
- з) наземная аппаратура на базе Atmega328p, задающая высоту и время удержания системы;

и) гибкий провод сетевого питания, обеспечивающий передачу переменного напряжения на борт.

Преимуществами, а также отличием данной автономной платформы от стандартного квадрокоптера являются время работы – нет зависимости от уровня заряда аккумулятора или топлива в бортовом электрогенераторе, а также отсутствие необходимости регистрации квадрокоптера как беспилотного авиационного средства, что упрощает использование в промышленных, домашних или уличных целях.

Первоначально была смоделирована и собрана разборная рама квадрокоптера из фанеры под размер винтов диаметром 10 дюймов с конструкцией под несущее оборудование – блок питания. При расчете силового питания от бортового преобразователя сетевого напряжения в 12 В постоянного были учтены такие факторы, как масса всей конструкции с проводом, потери на проводе, запас мощности источника питания при длительной работе, при взлете и посадке. Этап сборки изображен на рис. 1.

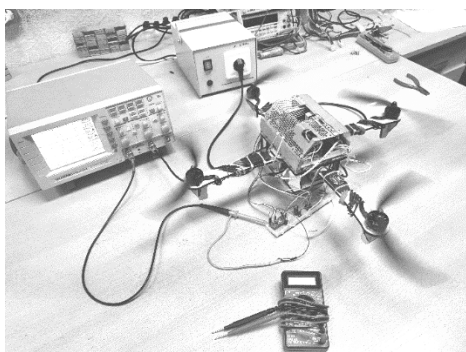


Рис. 1. Система на этапе безопасной сборки полетного контроллера

Далее были разработаны полетный контроллер и аппаратура, схема которых приведена на рис. 2, на базе МК1 микроконтроллеров Atmega328p и гироскопа – акселерометра MPU. Код основного контроллера протестирован и изменен летом на первой сборке. Второй микроконтроллер МК2 обрабатывает сигналы с земли, информацию с бортовых датчиков и управляет основным: удержание заданной высоты H_m , контроль уровня напряжения V_{in} , тока I_{in} , температуры силовых узлов квадрокоптера $Temp$. Приемники, передатчики RX и TX работают на частоте 433 МГц и обеспечивают связь устройств. Система управляет драйверами ESC1...4 моторов M1...4, удерживая положение платформы в пространстве и высоту на основе трех про-

граммных ПИД-регуляторов, стабилизирующих две оси наклона и высоту полета.

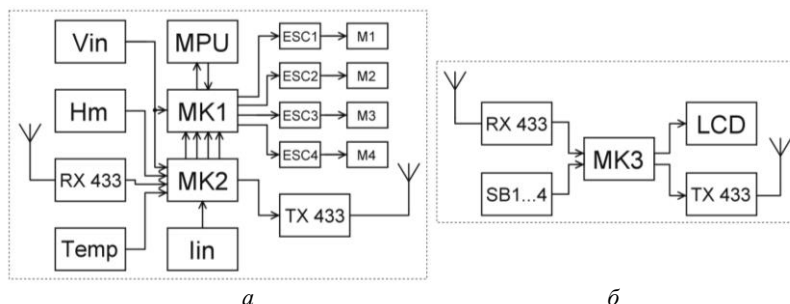


Рис. 2. Структурная электрическая схема бортовой системы (а) и наземной аппаратуры управления (б)

Прототип создан для демонстрации возможности удерживать осветительное оборудование на высоте до 5 м, время работы предположительно ограничено ресурсом компонентов, должно обеспечивать до 10 ч непрерывной работы. Ограничение по высоте до 5 м обусловлено выбором более точного ультразвукового датчика расстояния до поверхности земли и обеспечивающего работу только в данном диапазоне высот. Добавление барометрического датчика высоты позволит увеличить рабочую высоту до десятков метров, но оценка технической осуществимости возможна на таком прототипе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курс группового проектного обучения «Разработка многофункционального беспилотного летательного аппарата» [Электронный ресурс]. – URL: <https://gpo.tusur.ru/chairs/11/projects/1786> (дата обращения: 11.03.2025)
2. Федоров В.Н. Вариант бюджетного квадрокоптера для создания мобильных систем связи / В.Н. Федоров, А.С. Ставский // Сети и системы связи: матер. докл. VI междунар. науч. конф. ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации «Шарыгинские чтения», Томск, 9 – 11 октября 2024 г. – С. 251–255.

УДК 621.317.441

МЕТАЛЛОИСКАТЕЛЬ НА БАЗЕ ARDUINO

И.А. Попков, С.Н. Столяров, студенты ИЯТШ

г. Томск, НИ ТПУ, iap44@tpu.ru

Представлен проект сборки металлоискателя на базе микроконтроллера Arduino. Рассмотрены теоретические основы работы металлодетекторов, проведен анализ существующих моделей и

технологий, а также разработаны схема устройства и программное обеспечение для управления процессом поиска. Работоспособность устройства проверена экспериментально, установлены его возможности и ограничения.

Ключевые слова: металлоискатель, металлодетектор, электромагнитное поле, частота, Arduino.

С течением времени по всему миру в почве накапливаются металлические предметы различных габаритов, которые оказывают негативное влияние на окружающую среду. Современные модификации металлоискателей зачастую имеют высокую стоимость, в связи с чем интерес представляет разработка недорогого самодельного аналога из подручных средств, обладающего достаточными характеристиками для обнаружения металлических предметов и пригодного для использования, например, в саду или на загородной территории. Целью данного проекта является разработка такого самодельного металлоискателя на базе микроконтроллера Arduino.

Принцип работы: металл обладает токопроводящими свойствами, а значит, если в магнитное поле, создаваемое катушкой, попадает металлический предмет, то вокруг него создается собственное магнитное поле, которое изменяет магнитное поле катушки и тем самым изменяет частоту в колебательном контуре. Контроль изменений частоты осуществляется с помощью платы Arduino [2].

Схема электрическая принципиальная разработанного устройства представлена на рис. 1.

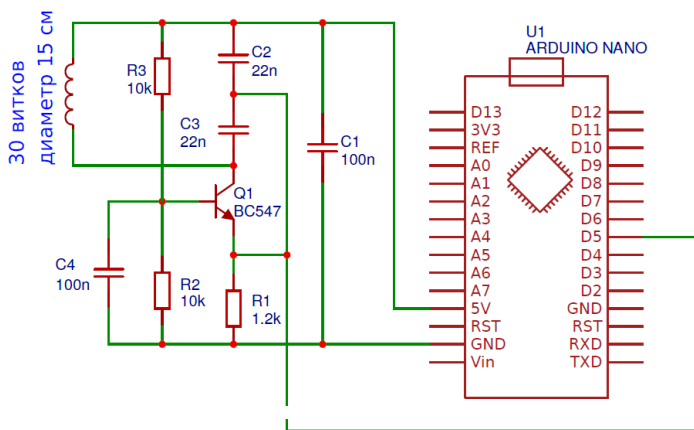


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема устройства

Собранный металлоискатель работает на частоте 120 кГц, что позволяет ему обнаруживать металлы с достаточно большим удельным сопротивлением [1]. Готовое устройство имеет два режима работы:

– динамический, предусматривающий непрерывное движение поисковой катушки. В этом случае реакция прибора будет наблюдаться только при движении катушки над металлом, в противном случае, если катушку остановить над объектом, реакции не будет;

– статический, основанный на запоминании частоты от металлического объекта без необходимости постоянного перемещения прибора. Этот режим используется для точного определения местоположения цели после первоначального обнаружения [2].

Пульт управления металлоискателя состоит из следующих компонентов (рис. 2):

- тумблер смены режимов: динамический, статический;
- кнопка для запоминания текущей частоты (для статического режима);
- потенциометр, меняющий чувствительность металлоискателя;
- динамик для звуковой индикации обнаружения металлического предмета;
- разъем для наушников.

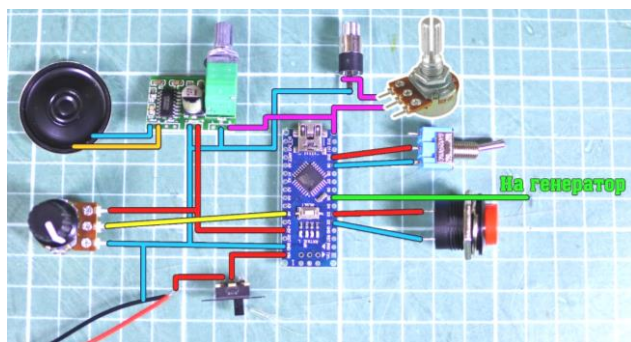


Рис. 2. Покомпонентная схема устройства металлоискателя

В результате работы был собран металлоискатель, позволяющий находить металлические предметы на расстоянии до 14 см с возможностью регулировки громкости от 0 до 60 дБ, подключения наушников, изменения чувствительности и переключения режимов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Как работает металлоискатель: принцип работы, устройство, виды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://prokop.udamiti.ru/stati/kak-rabotaet-metalloiskatel-printsip-raboty-ustroystvo-vidy>, свободный (дата обращения: 07.03.2025).

2. Металлоискатель на Arduino своими руками [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://alexgyver.ru/metall-detector-1/>, свободный (дата обращения: 07.03.2025).

ПОДСЕКЦИЯ 1.3

РАДИОТЕХНИКА

*Председатель – Семенов Э.В., проф. каф. РСС, д.т.н., доцент
зам. председателя – Артищев С.А., и.о. зав. каф. КУДР, к.т.н.*

УДК 621.396

РАЗРАБОТКА ДВОЙНОГО БАЛАНСНОГО СМЕСИТЕЛЯ С ИНТЕГРИРОВАННЫМ УСИЛИТЕЛЕМ СИГНАЛА ГЕТЕРОДИНА НА ОСНОВЕ КМОП-ТЕХНОЛОГИИ

Д.В. Борисов, инж.-исследователь ЛПРИСиСНК;

А.А. Кокотов, зав. лаб. ЛПРИСиСНК

г. Томск, ТУСУР, danil.v.borisov@tusur.ru

Представлены результаты разработки и моделирования двойного балансного смесителя с интегрированным усилителем сигнала гетеродина на основе отечественной 180 нм КМОП-технологии. Рабочий частотный диапазон устройства составил 1,2–6,5 ГГц. Среднее значение коэффициента преобразования в рабочей полосе составляет –10,7 дБ. Необходимая мощность сигнала гетеродина 0–4 дБм. Входная мощность – 0 дБм. Уровень развязок между портами более 30 дБ. Потребляемая мощность – 326,6 мВт.

Ключевые слова: КМОП, 180 нм, смеситель, усилитель сигнала гетеродина, каскод.

Смеситель представляет собой электронное устройство, формирующее на выходе спектр комбинационных частот, возникающий при взаимодействии двух и более сигналов разной частоты. Данное устройство может применяться в различных телекоммуникационных системах (спутниковые системы навигации, сотовая связь и т.п.). Основной задачей смесителя является перенос сигнала промежуточной частоты (ПЧ) в область высоких частот (ВЧ) при преобразовании «вверх», или, наоборот, понижение частоты сигнала ПЧ при преобразовании «вниз» [1].

Существует два основных типа смесителей: пассивные и активные. Пассивные смесители разрабатываются на основе диодов или транзисторов в ключевом режиме, выступающих в роли управляемого сопротивления. В активных же смесителях применяются транзисторы, работающие в активном и ключевом режиме. Данные устройства также можно разделить на балансные и небалансные. Основным пре-

имуществом балансных смесителей является подавление нежелательных спектральных составляющих на выходе, что повышает уровень развязок [1, 2].

Входы и выход двойного балансного смесителя, как правило, дифференциальные. Функцию преобразования несимметричного сигнала в симметричный и наоборот выполняет балун [2]. Данные устройства также могут применяться в качестве согласующих цепей и для подачи напряжения питания/смещения на элементы схемы.

Для корректной работы смесителя необходима высокая мощность сигнала гетеродина, которую бывает достаточно сложно обеспечить на практике. В случаях, когда мощность сигнала гетеродина недостаточна для стабильной работы смесителя, применяют усилитель сигнала гетеродина (УСГ). Данное устройство позволяет снизить требования к внешнему сигналу гетеродина и увеличить развязки между каналами смесителя [3].

Наиболее оптимальной для реализации УСГ является каскодная схема, так как обладает широкой полосой пропускания, а также возможностью обеспечения высокой выходной мощности сигнала за счёт повышенного, по сравнению с каскадной схемой, напряжения питания, что является критичным параметром сигнала гетеродина [4]. Разработанная схема представляет собой псевдодифференциальный усилитель, так как в истоках транзисторов не используется источник тока, что позволяет увеличить размах выходного напряжения. В результате моделирования были получены следующие характеристики УСГ: рабочая полоса частот данного устройства: 0,85–6,85 ГГц; коэффициенты отражения от входного/выходного порта в полосе пропускания на уровне –10 дБ; коэффициент усиления $8,36 \pm 0,82$ дБ. Выходная мощность в точке сжатия на 1 дБ составляет 17,6 дБм.

На рис. 1 представлена принципиальная схема разработанного двойного балансного смесителя с интегрированным УСГ.

Данный смеситель разработан по пассивной схеме на основе n -канальных МОП-транзисторов. На входе ВЧ-сигнала установлен балун, преобразующий несимметричный сигнал в дифференциальный, а также служащий согласующей цепью. Резисторы R1 и R2 необходимы для подачи напряжения смещения на затворы транзисторов ядра смесителя для снижения требований к мощности сигнала гетеродина.

Далее при помощи САПР Cadence была разработана топология ИС смесителя (рис. 2). Размеры кристалла – $2,62 \times 1,27$ мм².

На рис. 3 представлены характеристики разработанного двойного балансного смесителя при мощности сигнала гетеродина 0 дБм. В зависимости от частоты ВЧ-сигнала частота ПЧ-сигнала равна $f_{IF} = f_{LO} - f_{RF} = 500$ МГц, что соответствует верхней настройке гетеродина.

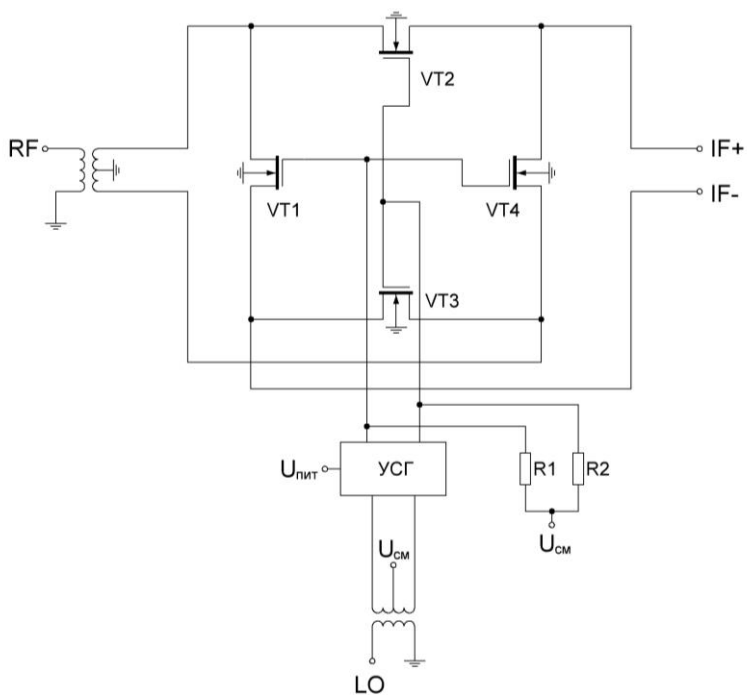


Рис. 1. Принципиальная схема разработанного двойного балансного смесителя

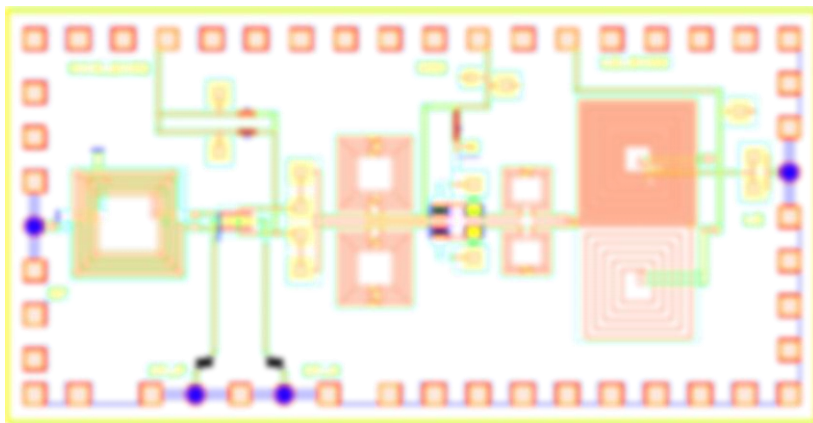


Рис. 2. Топология СВЧ ИС двойного балансного смесителя

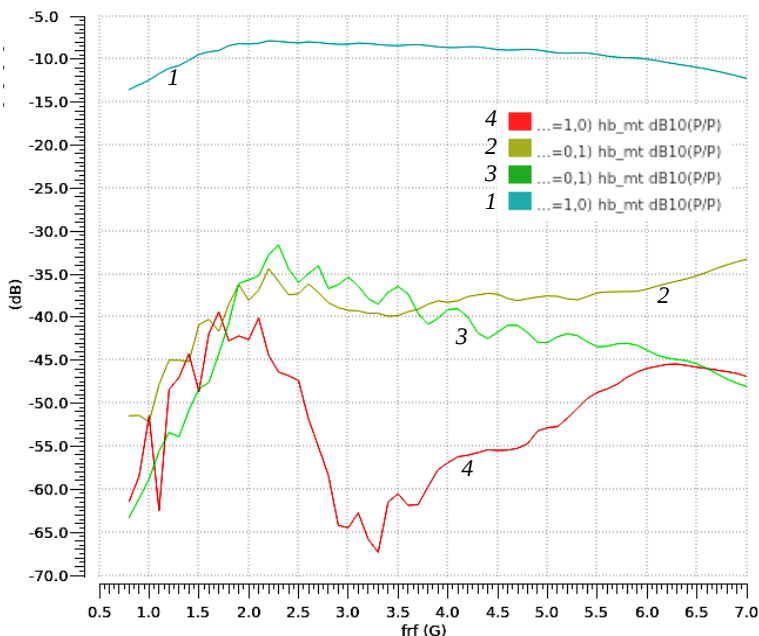


Рис. 3. Коэффициент преобразования смесителя при $P_{LO} = 0$ дБм в зависимости f_{RF} (1); развязка RF-IF (2); развязка LO-IF (3); развязка LO-RF (4)

По полученным характеристикам видно, что минимальное значение коэффициента преобразования составляет $-13,54$ дБ, максимальное же равно $-7,85$ дБ. Рабочий диапазон частот по ВЧ-сигналу составляет $1,2 - 6,5$ ГГц. Уровень развязок между портами RF-IF, LO-IF и LO-RF более 30 дБ. Увеличение мощности сигнала гетеродина приводит к небольшому увеличению коэффициента преобразования (при увеличении мощности сигнала гетеродина до 6 дБм коэффициент преобразования увеличивается на 0,5 дБ), однако это также приводит к ухудшению развязок между портами. Уровень входной мощности $P_{1дБ}$ в данном случае составляет 0 дБм. При дальнейшем увеличении данного значения коэффициент преобразования резко уменьшается. Диапазон сигнала ПЧ, при котором устройство работоспособно: DC – 500 МГц. Потребляемая мощность – 326,6 мВт при напряжении питания 3,3 В.

Разработка ИС была выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект «Молодежные лаборатории», уникальный идентификатор FEWM-2025-0004). Производство интегральной микросхемы

было выполнено за счет средств Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по государственному заданию на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW».

ЛИТЕРАТУРА

1. Mass S. The RF and Microwave Circuit Design Cookbook // Artech House. – 1998. – P. 267.
2. Golio M., Golio J. RF and Microwave Circuits, Measurements, and Modeling. – CRC Press, 2007. – P. 532.
3. Subhash Chandra B. Microwave Active Devices and Circuits for Communication. – Ahmedabad: Springer, 2018. – 691 p.
4. Садовомский А.С. Приёмо-передающие радиоустройства и системы связи. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 243 с.

УДК 621.391.31

РАЗРАБОТКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ИНТЕРФЕЙСА I2C В 8-БИТНЫЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ДВУНАПРАВЛЕННЫЙ ПОРТ НА ОСНОВЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КМОП-ТЕХНОЛОГИИ

*М.А. Миягашев, инж.-исследователь ЛПРИСиСНК;
Ф.И. Шеерман, в.н.с. НИИ МЭС; А.А. Кокотов, зав. ЛПРИСиСНК
г. Томск, ТУСУР, mikhail.a.miyagashhev@tusur.ru*

Представлены результаты разработки и моделирования преобразователя последовательного интерфейса I2C в 8-битный параллельный двунаправленный интерфейс на основе отечественной 180 нм КМОП-технологии. Максимальная тактовая частота равна 5 МГц. Напряжение питания составляет +3,3 В или +5 В. Количество регистров управления – 4. Размер кристалла – 2,73 мм².

Ключевые слова: КМОП, 180 нм, преобразователь, интерфейс, I2C, цифровой, Verilog, HDL.

Преобразователь предназначен для согласования устройств с разными типами интерфейсов. Благодаря своей универсальности он может быть использован в различных областях: устройства интернета вещей, системы управления, датчики, а также в составе СВЧ-приемников и передатчиков для формирования сигналов управления [1–3].

Интерфейс I2C используется для передачи данных между устройствами, подключенными через линии данных (SDA) и синхронизации (SCL). Устройства делятся на ведущие (master), иницирующие пере-

дачу данных по шине и генерирующие тактовый сигнал, и ведомые (slave), реагирующие на сигналы ведущего [4].

Любая передача данных начинается с сигнала «СТАРТ» и заканчивается сигналом «СТОП». Данные передаются пакетами по 8 бит (1 байт). После каждого байта отправителю от получателя приходит бит подтверждения (ACK) или его отсутствие (NACK) [4].

В начале передачи данных ведущий после команды «СТАРТ» отправляет 7-битный адрес ведомого и бит чтения/записи (R/W) [5].

В данной статье рассматривается разработка преобразователя интерфейса, ведомого I2C в параллельный двунаправленный порт, на основе отечественной 180 нм КМОП-технологии АО «Микрон». На рис. 1 представлена структурная схема преобразователя.

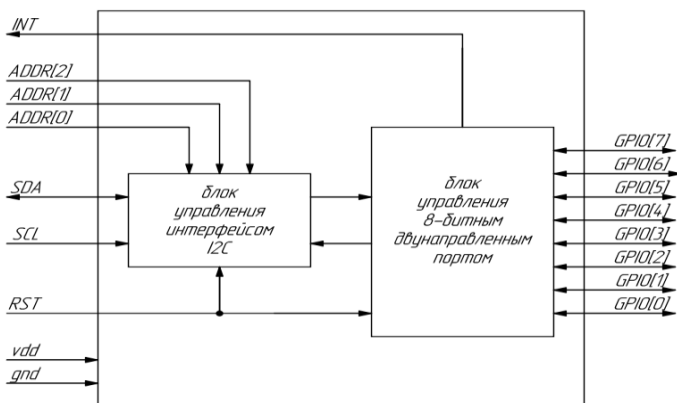


Рис. 1. Структурная схема цифрового преобразователя

Блок управления интерфейсом I2C получает младшие 3 бита адреса устройства (ADDR) и предназначен для передачи данных по линиям SCL и SDA, а также для обмена сигналами с блоком управления двунаправленным портом.

Блок управления 8-битным портом настраивает линии GPIO в режим входа или выхода в зависимости от сигналов, полученных от I2C-блока, и передаёт ему текущие логические уровни на выводах GPIO.

Помимо этого, предусмотрены следующие выводы: RST, который позволяет производить асинхронный сброс всех регистров, и INT для отслеживания изменения логического уровня на линиях GPIO и генерации сигналов прерывания.

Исходя из структурной схемы был разработан код устройства на языке Verilog HDL, диаграмма состояний конечного автомата которого была получена в среде Quartus и показана на рис. 2.

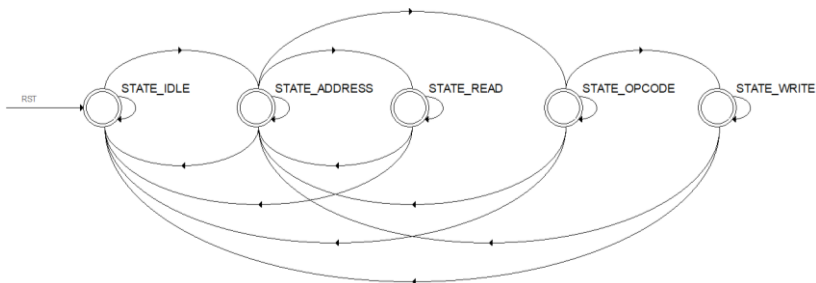


Рис. 2. Диаграмма состояний конечного автомата преобразователя

Данная диаграмма полностью соответствует принципу работы интерфейса I2C. При подаче сигнала RST устройство переходит в состояние STATE_IDLE, откуда оно может перейти только в режим чтения адреса. Далее, в зависимости от входных данных, устройство переходит либо в режим записи (STATE_OPCODE и STATE_WRITE), режим чтения (STATE_READ) либо обратно в STATE_IDLE.

Состояние STATE_OPCODE используется для записи командного байта, который обеспечивает доступ к регистрам управления двунаправленным параллельным портом. Соответствие командных байтов регистрам, их значения по умолчанию и доступ к ним приведены в таблице.

Командный байт

Командный байт	Регистр	Доступ	Значение по умолчанию
0000 0001	Input Port	Только чтение	XXXX XXXX
0000 001?*	Output Port	Чтение/Запись	0000 0000
0000 01??*	Polarity Inversion	Чтение/Запись	0000 0000
0000 1???	I/O Direction	Чтение/Запись	1111 1111

* Символ «?» означает, что значение бита не влияет на результат.

Далее был разработан модуль верхнего уровня, в котором указывается соединение кода устройства с цифровыми контактными площадками из библиотеки IOLIB_80.

В данном модуле выводы SCL, RST, ADDR[2], ADDR[1] и ADDR[0] подключены к входным падам IBUF, INT – к выходному B8CR, SDA – к двунаправленному BD8SCR, GPIO[7]-GPIO[0] – к двунаправленным BD8SCRUP с подтяжкой к питанию. Помимо этого, для обеспечения питания 3,3–5 В предусмотрены пады питания VDDIOCO и VDD3IOCO, а также пады земли VSSIOCO и VSSIICO_ESD5.

При логическом синтезе с использованием инструмента Genus были указаны библиотеки CORELIB8DLL и IOLIB_80 при $U_{вх} = 1,2$ В и $t_{окр} = 125$ °C, что соответствует наихудшим условиям эксплуатации.

На основе результатов синтеза с использованием средств Innovus и Virtuosio была разработана топология преобразователя, показанная на рис. 3, и проведена ее физическая верификация.

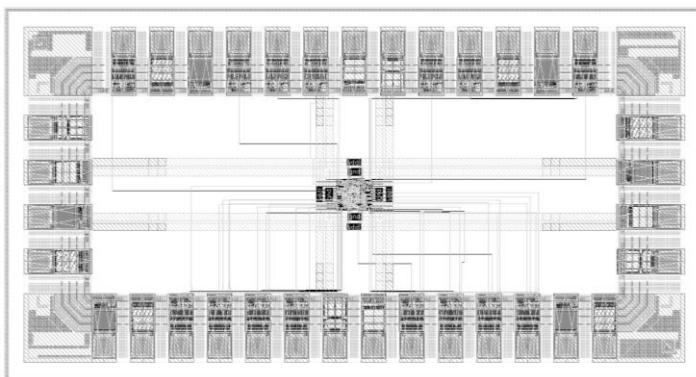


Рис. 3. Топология преобразователя

Помимо этого был разработан модуль тестового окружения (testbench) и проведено моделирование работы топологии при частоте тактового сигнала SCL, равной 5 МГц, с использованием средств Xmvverilog и Simvision. Результаты моделирования показаны на рисунке 4. Задержки при переключении линии SDA составили $t_r = 9,39$ нс и $t_f = 9,73$ нс.

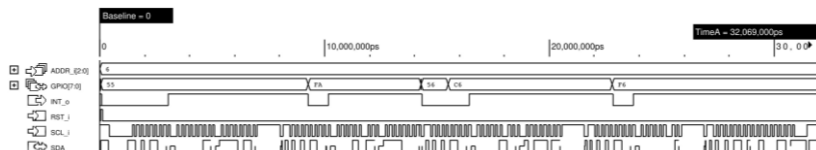


Рис. 4. Результаты моделирования преобразователя

Микросхема размещена в производство и в настоящий момент находится на завершающем этапе.

Разработка ИС была выполнена при поддержке Минобрнауки России (проект «Молодежные лаборатории», уникальный идентификатор FEWM-2025-0004). Производство интегральной микросхемы было выполнено за счет средств Минобрнауки России в рамках федерального проекта «Подготовка кадров и научного фундамента для электронной промышленности» по государственному заданию на выполнение научно-исследовательской работы «Разработка методики прототипирования электронной компонентной базы на отечественных микроэлектронных производствах на основе сервиса MPW».

ЛИТЕРАТУРА

1. A 56–65 GHz Highly-Integrated FMCW Radar Transceiver with 7.8 dB NF and 8 GHz Chirp-Bandwidth in 65-nm CMOS / J. Chen, S. Wang, J. Liu et al. // IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. – 2024.
2. A 10ns Delay Range 1.5GHz BW True-Time-Delay ArrayBased Passive-Active Signal Combiner with Negative-Cap Stabilized RAMP for Fast Precise Localization / Q. Xu, C.-C. Lin, A. Wadaskar et al. // IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. – 2024.
3. A high-precision and low-power capacitive pressure sensor interface IC with wireless power and data transfer for a pressure sensor implant / C. Zhang, R. Gallichan, D.P. Leung, D.M. Budgett, D. McCormick // IEEE Sensors Journal. – 2023. – Vol. 23, No. 7. – P. 7105–7114.
4. Design of I2C Protocol / S. Patel, P. Talati, S. Gandhi et al. // International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science/ – 2019. – Vol. 5. – P. 741–744.
5. Дьячков Ю.Е. Принцип работы последовательного интерфейса передачи данных Inter-Integrated Circuit (I2C) // Наука, инновации, образование: актуальные вопросы XXI века. – 2019. – С. 49–54.

УДК 621.396.96

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ SDR-СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ БПЛА

Г.И. Мурачев, оператор роты (научной)

*Научный руководитель Д.Ф.Ткачев, нач. третьего науч.-исслед. отд.
научно-исследовательского центра*

*г. Санкт-Петербург, Военная орденов Жукова и Ленина
Краснознаменная академия связи им. Маршала Советского Союза
С.М. Буденного МО РФ, grigoriy.m99@mail.ru*

Рассматривается использование SDR-систем (Software Defined Radio) для обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Описаны принципы работы SDR, включая прием, анализ и идентификацию радиосигналов дронов. Выделяются преимущества технологии, такие как гибкость, масштабируемость и интеграция с другими сенсорами. Рассматриваются ограничения, включая влияние радиощумов и скрытую связь, а также перспективы развития, включая применение искусственного интеллекта и кооперативных сетей.

Ключевые слова: SDR, БПЛА, радиосигналы, безопасность.

Сегодняшний день ознаменован стремительным развитием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), или дронов, которые находят широкое применение в самых разных сферах деятельности, будь то сельское хозяйство, картография, доставка грузов или экологический мониторинг. Однако наряду с бесспорными преимуществами

увеличение числа дронов вызывает вполне обоснованные опасения в отношении безопасности. Случаи несанкционированного проникновения дронов в запретные зоны, такие как аэропорты, военные объекты или частные владения, создают реальные угрозы. Чтобы предотвратить подобные инциденты, крайне важно располагать надежными средствами для своевременного обнаружения и нейтрализации дронов. Одними из таких инструментов являются системы, основанные на технологии Software Defined Radio (SDR). Рассматривается возможность применения систем Software Defined Radio (SDR) для решения задачи обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Особое внимание уделяется принципам функционирования SDR, включая процессы приема, анализа и идентификации радиосигналов от дронов.

Принцип работы SDR в обнаружении БПЛА. Основные аспекты работы SDR включают следующие этапы: прием радиосигнала в заданном диапазоне частот, цифровая обработка принятого сигнала, анализ структуры и содержания сигналов, а также сравнение полученных данных с базой данных сигнатур известных моделей дронов. Важную роль играет определение координат источника сигнала, которое может осуществляться с использованием методов триангуляции или корреляционного анализа [2]. Процесс обнаружения выглядит следующим образом:

SDR принимает радиосигнал в заранее заданном диапазоне частот. Большинство дронов передают данные на фиксированных частотах, таких как 2,4 или 5 ГГц (используемые в сетях Wi-Fi), а также применяют GPS и другие навигационные системы.

Принятый сигнал подвергается цифровой обработке, включающей фильтрацию и демодуляцию. Затем специальное программное обеспечение анализирует его структуру и содержимое, пытаясь найти характерные признаки, присущие конкретным моделям дронов.

После анализа программа сопоставляет полученные данные с имеющейся базой данных, содержащей информацию о сигнатурах известных моделей дронов. Если совпадение найдено, система подтверждает факт присутствия дрона.

В некоторых случаях SDR-система может вычислить примерное местоположение источника сигнала, используя методы триангуляции или корреляционный анализ.

Преимущества использования SDR для обнаружения БПЛА. Преимущества использования SDR для обнаружения БПЛА заключаются в многофункциональности, масштабируемости, доступности, высокой чувствительности и совместимости с другими сенсорами. Эти характеристики позволяют эффективно использовать SDR в различных сценариях, где требуется оперативное обнаружение дронов.

SDR-системы обладают возможностью работы в широком диапазоне частот и поддержки разнообразных типов модуляции, что делает их универсальными инструментами для обнаружения большинства современных дронов. Эта особенность обусловлена архитектурой SDR, где значительная часть функций реализуется программным обеспечением, позволяя быстро адаптироваться к новым стандартам и типам сигналов. Например, поддержка диапазона частот от десятков мегагерц до нескольких гигагерц позволяет охватывать большинство используемых в дроностроении коммуникационных стандартов, таких как Wi-Fi, ZigBee или Bluetooth. Кроме того, разнообразие поддерживаемых видов модуляции (например, BPSK, QAM, OFDM) позволяет детектировать сигналы даже тех дронов, которые используют нестандартные или зашифрованные протоколы связи.

Одной из ключевых особенностей SDR является возможность масштабирования системы путем простого обновления программного обеспечения и добавления новых модулей. Это свойство особенно ценно в контексте создания распределённых систем наблюдения, где необходимо объединить несколько SDR-устройств для увеличения покрытия и повышения точности определения местоположения дронов. Масштабируемость также важна для интеграции SDR с другими сенсорами, такими как камеры видеонаблюдения или тепловизоры, что позволяет создавать комплексные системы мониторинга и реагирования на угрозы.

По сравнению с традиционными радиочастотными системами SDR характеризуются относительно низкой стоимостью, что делает их экономически выгодными для массового внедрения. Низкая цена обусловлена отсутствием необходимости в специализированных аппаратных компонентах, так как большая часть функциональности реализована программно. Это снижает затраты на производство и обслуживание оборудования, что особенно актуально для государственных структур и коммерческих компаний, стремящихся минимизировать расходы на обеспечение безопасности.

Современные SDR обладают высокой чувствительностью, что позволяет обнаруживать даже слабые радиосигналы на значительных расстояниях. Чувствительность SDR зависит от качества аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и возможностей цифрового процессора сигналов (DSP), который обрабатывает принятые сигналы. Чем выше разрядность АЦП и частота дискретизации, тем точнее можно восстановить исходный сигнал и выделить полезные данные из шума. Также важным фактором является способность SDR к адаптивной фильтрации, которая минимизирует влияние внешних помех и позволяет точно выделять целевые сигналы.

SDR могут быть легко интегрированы с другими сенсорами, такими как камеры, радары и акустические датчики, что существенно расширяет функциональные возможности системы. Комплексные системы, построенные на основе SDR, способны не только обнаруживать дроны, но и отслеживать их траекторию движения, определять тип аппарата и классифицировать возможные угрозы. Такое сочетание различных датчиков позволяет создать высокоэффективные системы раннего предупреждения и противодействия несанкционированному использованию дронов.

Заключение. Применение SDR-систем для обнаружения дронов представляется одной из важнейших стратегий в поддержании безопасности воздушного пространства. Их гибкость, широкая функциональность и невысокая стоимость делают SDR предпочтительными для организаций разного масштаба. Хотя пока остаются нерешёнными некоторые технические и эксплуатационные вопросы, продолжающееся совершенствование технологий даёт надежду на появление ещё более эффективных решений в будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костин М.С. Архитектурно-конфигурируемые SDR-технологии радиомониторинга и телеметрии / М.С. Костин, А.Д. Ярлыков. – М.: Инфра-Инженерия, 2021. – 147 с.
2. Джесси Рассел. Программно-определяемая радиосистема. – М.: Книга по требованию, 2013. – 113 с.
3. Михайлов В.Ю. Учебно-исследовательский программно-аппаратный комплекс прототипирования компонентов радиосистем на основе технологии SDR / В.Ю. Михайлов, Р.Б. Мазепа. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2024. – 138 с.

УДК 621.396.67.091.1

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТМАССОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА S-ПАРАМЕТРЫ АНТЕНН БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*М.А. Ромащенко, проф., д.т.н.; Д.В. Васильченко, м.н.с. молодеж-
ной лаб.; Д.А. Пухов, инж.-исследователь молодежной лаб.;
Г.П. Золкин, С.Н. Паришин, лаборанты УПК БАС
г. Воронеж, ВГТУ, каф. КИПР, kpr@vorstu.ru*

Рассмотрено влияние пластмассовых покрытий на S-параметры антенн дипольного типа, работающих в стандартных диапазонах 915 МГц и 1,2 ГГц. Продемонстрированы измерения влияния диэлектрической проницаемости и коэффициента отражения (S_{11}) на характеристики антенн. Для реализации эксперимента были ис-

пользованы следующие виды пластмассовых покрытий: гликоль-модифицированный полиэтилентерефталат, ударопрочный полистирол и полилактид. Результатом работы служит оценка влияния пластмассовых материалов на электродинамические параметры антенн при монтаже на корпус БПЛА.

Ключевые слова: S-параметры, коэффициент отражения, диэлектрическая проницаемость, дипольная антенна, пластмассовые покрытия.

Стремительное развитие беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) привело к увеличению требований для обеспечения помехоустойчивой радиосвязи. Для передачи управляющих сигналов БПЛА оснащаются приемопередающими и **антенно-фидерными** устройствами, размещёнными на корпусе. При размещении антенн необходимо учитывать уровень искажения диаграммы направленности, взаимное влияние антенн и поляризацию радиосигнала. Кроме того, размещение этих устройств обусловлено необходимостью учета конструктивных ограничений, включая место размещения и материалы, окружающие **антенно-фидерные устройства** [1].

Неправильное размещение антенны и использование пластмассовых материалов с высокой диэлектрической проницаемостью может привести к увеличению потерь сигнала, изменению резонансной частоты и коэффициента отражения (S_{11}), а также к возрастанию электромагнитных помех за счет неоднородности диэлектрической среды. Электромагнитная энергия, излучаемая или принимаемая антенной, частично проходит через диэлектрик, а частично поглощается и отражается им, что влияет на характеристики передачи сигнала [2].

Зачастую для конструирования БПЛА применяют карбоновую раму, которая является токопроводящим материалом. В связи с этим для обеспечения надежного крепления антенно-фидерных устройств и защиты от внешних воздействий антенны помещают в пластмассовые покрытия. Данные покрытия изолируют антенны от взаимодействия с токопроводящей конструкцией, а также защищают их от механических повреждений и смещений во время эксплуатации БПЛА.

В эксперименте была произведена оценка влияния пластмассовых материалов на параметры антенн, которые были закреплены на карбоновой раме БПЛА: изменение уровня сигнала и S-параметры. Использовались антенны дипольного типа в диапазонах 915 МГц и 1,2 ГГц. Применялись следующие пластмассовые материалы: гликоль-модифицированный полиэтилентерефталат (Polyethylene Terephthalate Glycol, PETG), ударопрочный полистирол (High Impact Polystyrene, HIPS) и полилактид (Polylactic Acid, PLA) с различными

пигментами. Предполагается, что пигменты, добавляемые для придания цвета материалу, могут изменять его диэлектрические свойства. Это приводит к ухудшению коэффициента отражения и снижению эффективности излучения антенн.

Данные, представленные в таблице, получены в результате измерений с использованием векторного анализатора цепей. В ходе эксперимента оценивался параметр S_{11} , характеризующий коэффициент отражения антенны, что позволило определить уровень поглощения и отражения сигнала при использовании различных пластмассовых покрытий.

Измерения уровня сигнала (дБ)

Частота	Без покрытия	PETG	HIPS	PLA (голубой)	PLA (белый)	PLA (черный)
915 МГц	-50 дБ	-49 дБ	-50 дБ	-49 дБ	-52 дБ	-50 дБ
1,2 ГГц	-54 дБ	-51 дБ	-50 дБ	-51 дБ	-52 дБ	-51 дБ

Исходя из полученных данных, была проведена оценка влияния материалов на коэффициент стоячей волны (КСВ), коэффициент отражения, резонансные частоты и диаграмму направленности. На графиках изображена зависимость уровня сигнала от частоты. По оси абсцисс отложена частота, характеризующая частотный диапазон, по оси ординат – уровень сигнала в децибелах (рис. 1).

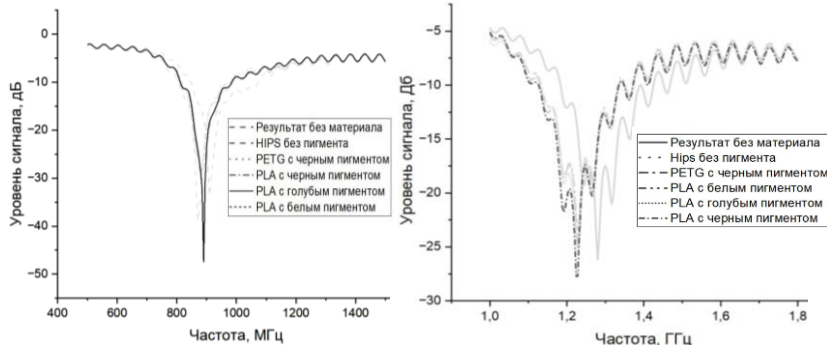


Рис. 1. Влияние пластмассовых покрытий на антенны в диапазонах 915 МГц и 1,2 ГГц

На частоте 915 МГц наблюдается смещение резонансной частоты из-за различной диэлектрической проницаемости материалов. Материал HIPS оказал минимальное воздействие на антенно-фидерные устройства за счет его низкой диэлектрической проницаемости

($\epsilon_r = 1,9 - 2,5$). Это связано с тем, что полистирол не проводит электричество и не взаимодействует с электромагнитным полем. В отличие от этого, материалы PLA и PETG, содержащие черный пигмент с углеродными волокнами, увеличивают диэлектрическую проницаемость и вызывают смещение резонансной частоты ($\epsilon_r = 2,7 - 3,5$) и ($\epsilon_r = 2,2 - 2,4$). В диапазоне 1,2 ГГц изменения длины эффективного излучателя обусловлены изменением коэффициента преломления среды. Материал HIPS оказал минимальное влияние, тогда как PLA с белым пигментом, содержащим диоксид титана (TiO_2), изменяет распространение электромагнитной волны.

Эксперименты показали, что HIPS снижает влияние на антенны благодаря низкой диэлектрической проницаемости, тогда как PLA и PETG вызывают смещение резонансной частоты и уменьшают эффективность излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» № FZGM-2024-0003.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ромащенко М.А. Измерение эмиссии излучаемых помех РЭС в задачах обеспечения ЭМС // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 6, № 7. – С. 20–22.
2. Antenna design [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://resources.altium.com/ru/p/best-pcb-antenna-design-software> свободный (дата обращения: 20.01.2025).

УДК 621.396.67.091.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ АНТЕНН НА ИХ ЧАСТОТНЫЙ ДИАПАЗОН

*М.А. Ромащенко, проф., д.т.н.; Д.В. Васильченко, м.н.с. молодеж-
ной лаб.; Д.А. Пухов, инж.-исследователь молодежной лаб.,
Г.П. Золкин, С.Н. Паршин, лаборанты УПК БАС
г. Воронеж, ВГТУ, каф. КИПР, kpr@vorstu.ru*

Исследуется влияние пластмассовых покрытий на резонансную частоту антенн беспилотных летательных аппаратов. Рассматриваются материалы с различными диэлектрическими свойствами и их воздействие на смещение рабочей частоты в диапазонах 915 МГц и 1,2 ГГц. Установлено, что материалы с высокой диэлектрической проницаемостью вызывают значительные изменения параметров

антенн, что необходимо учитывать при их проектировании и размещении.

Ключевые слова: резонансная частота, БПЛА, диэлектрическая проницаемость, дипольная антенна, пластмассовые покрытия.

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) играют важную роль в различных сферах деятельности человека, начиная от широкого спектра задач гражданского назначения и заканчивая применением при выполнении специальных задач. Одним из ключевых аспектов их функционирования является надежная связь, обеспечивающая передачу управляющих сигналов. Для передачи управляющих сигналов БПЛА оснащаются приемопередающими и антенно-фидерными устройствами, размещёнными на корпусе. Для минимизации занимаемого объёма технические средства, аппаратура и оборудование этих объектов имеют плотную компоновку и общие цепи питания и заземления [1]. Антенно-фидерные устройства, используемые в БПЛА, должны быть компактными, легкими и устойчивыми к внешним воздействиям. Кроме того, размещение этих устройств обусловлено необходимостью учета конструктивных ограничений, включая место размещения и материалы, окружающие антенно-фидерные устройства [2].

Для конструирования БПЛА применяется карбоновая рама, обладающая высокой прочностью и малой массой. Однако карбон индуцирует паразитные токи, изменяющие диаграмму направленности антенны и ухудшающие её эффективность излучения. Для снижения этих эффектов антенны размещают в пластмассовых изоляционных покрытиях, предотвращающих взаимодействие с проводящей средой и стабилизирующих параметры излучения. Кроме того, покрытия защищают антенну от механических повреждений, вибрации и внешних воздействий, а также фиксируют её положение, исключая нежелательные смещения.

Для анализа влияния пластмассовых покрытий на резонансные частоты антенн были проведены измерения в диапазонах 915 МГц и 1,2 ГГц. В эксперименте использовались закрепленные на карбоновой раме дипольные антенны и пластмассовые покрытия из гликоль-модифицированного полиэтилентерефталата (PETG), ударопрочного полистирола (HIPS) и полилактида (PLA) с различными пигментами. Измерения проводились с помощью векторного анализатора цепей (LiteVNA 64 Vector Network Analyzer.), фиксирующего изменение частоты в зависимости от материала покрытия.

Ниже представлен испытательный стенд для измерения резонансных частот антенны БПЛА (рис. 1).



Рис. 1. Испытательный стенд

В таблице представлены результаты измерений резонансной частоты антенн в диапазонах 915 МГц и 1,2 ГГц при использовании различных пластмассовых покрытий. Данные отражают изменения рабочей частоты антенны в зависимости от материала оболочки.

**Изменение резонансной частоты антенн
при использовании пластмассовых покрытий**

Покрытие	Частота, МГц	Частота, ГГц
Без	915	1,2
HIPS, чистый	917	1,201
PETG, черный	899	1,209
PLA, белый	901	1,291
PLA, голубой	905	1,214
PLA, черный	892	1,271

На частоте 915 МГц наблюдается смещение резонансной частоты из-за различной диэлектрической проницаемости материалов. Наименьшее влияние оказывает материал HIPS, который оказывает минимальное воздействие на рабочую частоту антенны. В то же время черный PLA и PETG вызывают значительное смещение резонансной частоты в сторону понижения вследствие высокой диэлектрической проницаемости из-за содержания углеродных волокон. В диапазоне 1,2 ГГц наибольшее смещение частоты зафиксировано при использовании PLA с белым пигментом, содержащим диоксид титана (TiO_2), что изменяет коэффициент преломления среды. Наименьшее влияние

в этом диапазоне оказал материал PETG, обеспечивая стабильность частотных характеристик антенны.

Эксперимент показал, что пластмассовые покрытия оказывают значительное влияние на резонансные частоты антенн. Использование покрытия из HIPS и PETG не оказывает изменений в смещении резонансных частот, тогда как черный и белый PLA приводят к смещению резонансной частоты. Это необходимо учитывать при выборе материалов для защиты антенн БПЛА, чтобы минимизировать негативное влияние на их рабочий диапазон.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» № FZGM-2024-0003.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ромашенко М.А. Методика оценки влияния электромагнитных помех на функционирование электронных средств в процессе их проектирования / М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, С.Н. Рожненко // Радиотехника. – 2021. – Т. 85, № 6. – С. 57–61. DOI: 10.18127/j00338486-202106-10.

2. Ромашенко М.А. Измерение эмиссии излучаемых помех РЭС в задачах обеспечения ЭМС // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. – 2010. – Т. 6, № 7. – С. 20–22.

УДК 004.716

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ И АНАЛИЗ ПОМЕХ В РАБОТЕ PLC-МОДЕМОВ

Н.С. Шидловский, студент каф. 402 МАИ

*Научный руководитель М.К. Золотенкова, ассистент каф. 704 МАИ
г. Москва, МАИ, skb-4@bk.ru*

Изучены типовые источники помех в сети электропитания на производстве. Также изучены типовые виды помех и их спектры на основе записанной из сети выборки. Даны рекомендации по улучшению работы разработанного на базе СКБ-4 МАИ узкополосного PLC-модема, которые положительно сказались на качестве его работы.

Ключевые слова: узкополосный модем, сеть электропитания, источники помех, виды шумов.

В современном мире всё более актуальными становятся проблемы организации связи и телеметрии через сети электропитания промышленных объектов. На базе СКБ-4 МАИ был разработан узкополосный PLC-модем с рабочей частотой 60,15 кГц. На рис. 1 приведена принципиальная схема передающей части данного модема.

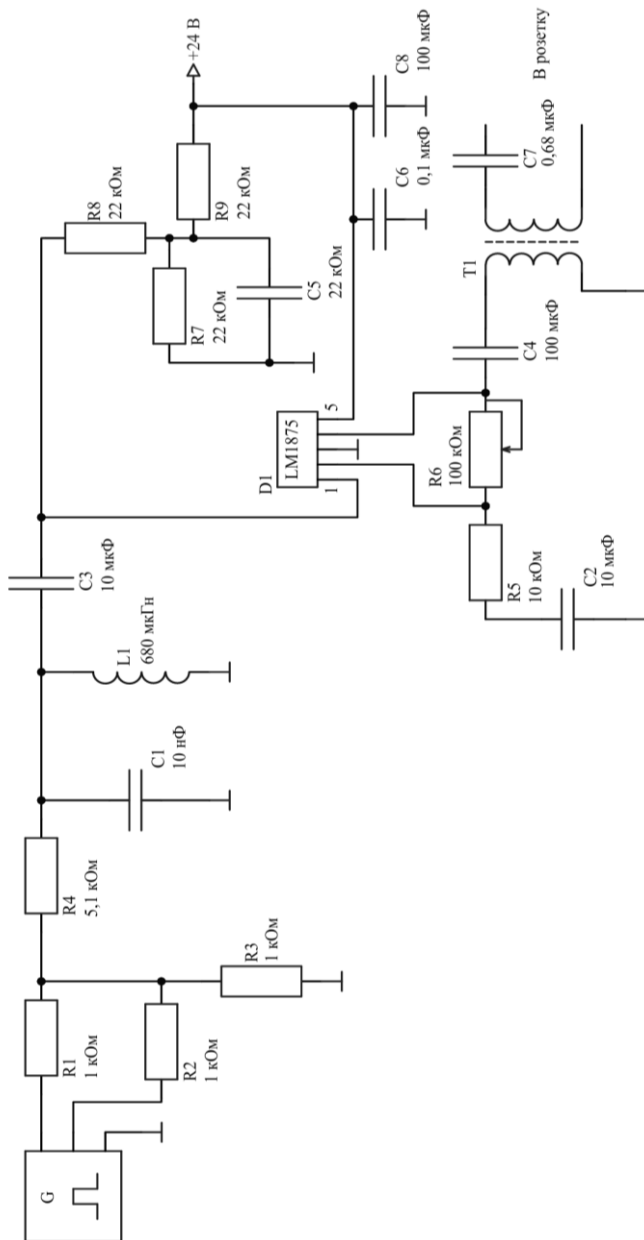


Рис. 1. Принципиальная схема передающей части исследуемого модема

Была предложена модуляция FSK с передачей в сеть двухчастотных радиопульсов. При работе устройства были выявлены сбои, обоснованные наличием в сети электропитания помех, природа которых вызвана массой факторов, требующих дополнительных исследований.

Исследования в данной работе посвящены выявлению и анализу источников помех в сетях электропитания, их классификации и анализу параметров шумов.

Были изучены виды типовых источников помех на предприятии.

Электрические двигатели: механические и электрические процессы в двигателях могут создавать гармоники и импульсные помехи, которые влияют на качество питания в сети. В особенности, двигатели с изменяемой частотой вращения (частотные преобразователи) могут генерировать помехи в виде высокочастотных гармоник.

Варисторы и устройства защиты: при включении и выключении устройств защиты, таких как варисторы, может происходить образование импульсных шумов, которые распространяются по сети.

Силовые полупроводниковые устройства: преобразователи, инверторы и другие устройства, использующие полупроводниковые элементы, могут генерировать гармоники и импульсные помехи из-за быстрого переключения напряжения.

Сварочные аппараты: процесс сварки, особенно при использовании инверторных аппаратов, вызывает образование электромагнитных помех и гармоник в сети из-за высокочастотных импульсов, генерируемых в процессе дугового сваривания.

Пускатели и стартеры: при пуске больших двигателей, таких как насосы или компрессоры, могут возникать резкие скачки напряжения, создающие шумы в сети.

Диммеры и регуляторы мощности. Электронные устройства, регулирующие яркость освещения или мощность других потребителей, могут создавать высокочастотные помехи в сети.

Нагрузки с нелинейными характеристиками. Такие устройства, как источники бесперебойного питания (ИБП), стабилизаторы напряжения, выпрямители и другие нелинейные нагрузки, могут вызывать гармонические искажения в сети.

На основе указанных источников были проанализированы виды шумов:

– *Асинхронный импульсный шум* представляет собой резкие, кратковременные (длительностью 10–100 мкс) изменения напряжения, часто возникающие из-за включения или выключения мощных электрических устройств (например, электродвигателей, сварочных

аппаратов) или из-за коротких замыканий. Спектр очень широкий, от нескольких Гц до нескольких десятков МГц, амплитуда напряжения может достигать 2 кВ.

– *Синхронный импульсный шум.* Этот вид помех обычно вызывается тиристорами в цепях управления силовых элементов. Тиристоры подключаются, когда напряжение достигает определенного уровня и генерируют высшие гармоники основной частоты сети, амплитуда которых зависит от нагрузки. Уровень помех в большинстве случаев не превышает 70 дБ/Вт на каждую гармонику.

– *Узкополосный шум.* Частота этих помех никоим образом не связана с частотой сети или ее высшими гармониками. Он содержит импульсы, которые повторяются между 50 и 200 кГц. Этот тип помех в основном создается переключаемыми источниками питания. Из-за высокой частоты эти помехи влияют на частоты, которые близки друг к другу и порождают частотные группы, которые аппроксимируются узкими полосами. Также характерны помехи известной частоты; они появляются в телевизорах с европейской системой PAL, с частотой 15,625 кГц.

– *Электромагнитные помехи* могут возникать из-за работы различных электроприборов, электродвигателей, трансформаторов. Спектр лежит в диапазоне от 10 кГц до 30 МГц. Уровень шума варьирует в зависимости от источника помехи.

– *Гармоники* возникают из-за нелинейных характеристик нагрузки (например, от выпрямителей, инверторов, силовой электроники). Они представляют собой синусоидальные колебания, которые являются кратными основной частоте сети. Спектр гармоник обычно расположен на кратных частотах основной сети (50, 100, 150 Гц и т.д.). Уровень гармоник обычно измеряется в процентах от основной частоты. Например, гармоника 3-го порядка может составлять 5–10% от амплитуды напряжения.

С помощью осциллографа была записана выборка, от которой путём преобразования Фурье получены спектры типовых источников шума (рис. 2).

Заключение. Все эти типы шумов могут варьировать по своим характеристикам в зависимости от источников помех, места их возникновения и типа электрооборудования. Эффективность защиты от этих шумов включает использование фильтров, стабилизаторов напряжения, экранирования и других методов для улучшения качества электроэнергии в спектральном смысле.

Наименее зашумлён участок около 60 кГц, также приемлемый уровень шума наблюдается на участке 65...70 кГц.

На основе анализа спектров шумов для применения в PLC рекомендуется частота 60,15 кГц.

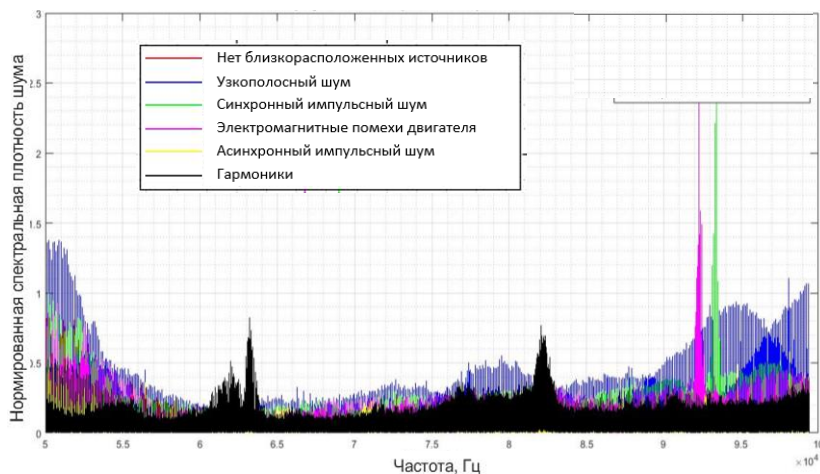


Рис. 2. Спектр шума в сети электропитания от различных источников

На основании полученных в ходе исследований рекомендаций были выбраны частотные диапазоны, наиболее подходящие для корректной и эффективной организации PLC-связи на предприятии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разумова О.Д. Анализ помех, создаваемых бытовыми электроприборами в сетях электропитания // Сборник тезисов работ междунар. молодёжной науч. конф.: XLVIII Гагаринские чтения, 2022. – М.: Перо, 2022. – 307 с.
2. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах / Пер. с англ.; под ред. В.Г. Губанкова. – М.: Мир, 1986. – С. 216–233.
3. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных сисетмах / Пер. с англ. Б.Н. Бронина; под ред. Н.В. Гальперина. – М.: Мир, 1979. – 317 с.
4. Цицикян Г.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учеб. пособие. – СПб: Изд-во СЗТУ, 2006. – 59 с.
5. Зимин В.В. Промышленные сети: учеб. пособие // Н.Новгород: НГТУ, 2006. – 252 с.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА АДАПТАЦИИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

П.Н. Федоров, с.н.с. науч.-исслед. центра; Д.Э. Андрусив, оператор роты (научной); И.Е. Титков, ст. оператор роты (научной);

Ю.А. Кудрявцева, м.н.с. науч.-исслед. центра

*Научный руководитель П.Н. Федоров, с.н.с. науч.-исслед. центра
г. Санкт-Петербург, Военная орденов Жукова и Ленина*

*Краснознаменная академия связи им. Маршала Советского Союза
С.М. Буденного МО РФ, nokia89244@mail.ru*

Изучены вопросы помехозащищенности устройств приема, передачи и обработки сигналов. Антенные решетки играют ключевую роль в современных системах связи и радиолокации. Однако их эффективность может значительно снижаться под воздействием различных дестабилизирующих факторов, таких как изменения сигнально-помеховой обстановки, неидентичности антенных элементов антенной решетки. Рассматривается применение алгоритмов адаптации антенной решетки для повышения устойчивости и производительности в условиях вышеперечисленных факторов.

Ключевые слова: АФУ, помехи, адаптация, ААР.

Современные системы связи становятся все более сложными и требуют высокой степени надежности и устойчивости к внешним воздействиям. Антенные решетки [1] являются ключевыми составляющими таких систем, они обеспечивают необходимую направленность и усиление сигналов, что очень важно для достижения качественной передачи данных. Однако под воздействием различных дестабилизирующих факторов может значительно снижаться эффективность по критерию отношения максимума мощности сигналов к суммарной мощности помех и шума – далее ОСПШ проектируемых адаптивных антенных решеток. Для того чтобы избежать серьёзное влияние таких факторов, в данной работе будет рассмотрено применение алгоритмов адаптации антенной решетки.

Алгоритм на основе метода градиентного спуска. Для оптимизации направленности антенной решетки используют информацию о качестве сигнала: уровень шума или отношение сигнал/помеха +шум. Делается это путем итеративного изменения фазовых сдвигов элементов решетки, тем самым система минимизирует влияние различного рода помех [2].

Данный метод является достаточно мощным инструментом для оптимизации параметров антенных решеток и других систем.

Алгоритмы Least Mean Squares (LMS). Данный алгоритм работает за счет адаптивного фильтра, который, в свою очередь, корректирует векторы весовых коэффициентов антенной решетки на основе минимизации ошибки [3] между требуемым и фактическим сигналами.

Алгоритм работает следующим образом: осуществляется подбор весовых коэффициентов и итеративно обновляет их на основе градиента ошибки по отношению к весам модели. Этот градиент высчитывается при использовании мгновенных значений выходных сигналов и соответствующей целевой функции.

Такой алгоритм подходит для динамических условий, когда требуется быстрая адаптация к изменениям положения подвижного объекта в пространстве.

Алгоритм формирования нулей диаграммы. Для формирования требуемой диаграммы направленности по критерию максимума отношения выходного сигнала к суммарной мощности помех и шума был применен минимаксный подход, позволяющий синтезировать робастный алгоритм управления адаптивной антенной решеткой с использованием так называемого проектора.

В качестве проектора P используем матрицу, пространство столбцов которой будет ортогонально векторам помех, т.е.

$$P = |\theta_1(\lambda_{\min}), \theta_2(\lambda_{\min}), \dots, \theta_n(\lambda_{\min})|. \quad (1)$$

При этом проектор P может быть восстановлен по любому из собственных векторов $\theta_1(\lambda_{\min})$ и применительно к линейной эквидистантной ААР может быть представлен в виде

$$P = W_1 W_2 \dots W_N, \quad (2)$$

$$W_1 = \theta_{j1}(\lambda_{\min}) / \theta_{j1}(\lambda_{\min}), \quad (3)$$

где $\theta_{j1}(\lambda_{\min})$ – первый элемент вектора $\theta_1(\lambda_{\min})$;

$$W_2 = F_{12}W + A_2, \quad (4)$$

где $W_3 = F_{13}W + A_3, \dots, W_{N(k+1)} = F_{1N}W_{1(k+1)}$.

Вектор весовых коэффициентов, получаемый в результате решения алгоритма, является собственным вектором корреляционной матрицы, обеспечивает максимальное усилие полезного сигнала при полном подавлении помех.

Однако при малых угловых расстояниях между источниками сигнала и помехи наряду с помехой будет подавляться также и полезный сигнал. С целью устранения этого эффекта подавления полезного сигнала необходимо производить регуляризацию алгоритма.

Закключение. Адаптация антенных решеток в условиях дестабилизирующих факторов является многоуровневой задачей, требующей интеграции различных методов и технологий. Использование адаптивных алгоритмов управления позволяет значительно повысить

устойчивость и эффективность антенных систем. В будущем ожидается дальнейшее развитие этих технологий, что откроет новые возможности для улучшения качества связи в различных областях применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Монзинго Р.А. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию / Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер.; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
2. Подавление помех в антенных решетках с ограниченным числом каналов адаптации / М.Р. Бибарсов и др. // Информация и космос. – 2015. – № 3. – С. 17–22.
3. Оптимальная обработка сигналов в адаптивных антенных решетках систем радиосвязи, радионавигации и радиолокации / М.Р. Бибарсов и др. // Радиоэлектроника. – 2011. – № 6. – С. 22–26.

УДК 621.376.4

«АСИММЕТРИЧЕСКИЕ» СОЗВЕЗДИЯ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ

Н.И. Крамаренко, аспирант каф. РТuРС

Научный руководитель П.А. Полушин, проф. каф. РТuРС, д.т.н.

г. Владимир, ВлГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,

nikitakramarenko889@gmail.com

Для решения задачи фазовой неопределённости при фазовой модуляции используются дифференциальные методы модуляции, что существенно снижает помехоустойчивость передачи. Описывается метод фазовой модуляции, использующий асимметрические «созвездия» при модуляции, что позволяет повысить помехоустойчивость.

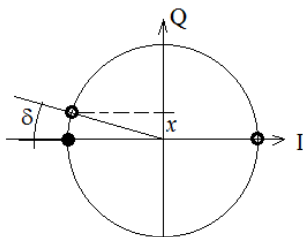
Ключевые слова: фазовая модуляция, созвездия, дифференциальное кодирование.

В современных системах передачи информации фазовая модуляция является одним из наиболее распространённых методов, обеспечивающих высокую эффективность передачи данных. Однако её использование сопровождается проблемами, связанными с неопределённостью фазы несущего сигнала. Традиционно для обеспечения точного совпадения частоты и фазы опорного генератора с параметрами несущего сигнала применяются дифференциальные методы модуляции, однако их использование приводит к снижению помехоустойчивости на 1–3 децибела [1].

В данной работе рассматривается метод фазовой модуляции, основанный на применении асимметричных «созвездий» [2, 3], позво-

В случае традиционного BPSK символам «0» и «1» соответствуют фазы 0 и 180° . В предлагаемом методе вместо 180° используется $180^\circ - \delta$, где δ – небольшой угол (меньше 45°). На рис. 1 показан случай, когда начальная фаза была определена правильно. Наблюдая последовательность фаз, можно анализировать последовательность принятых фаз и корректировать ошибки на приёмной стороне.

На стороне передатчика (Прд) к синусоидальному напряжению, вырабатываемому генератором (Г1) в фазовращателе (ФВ1) добавляется фазовый сдвиг, равный 90° . Атенуатор (Атт) устанавливает уровень, определяющий угол δ .

[illegible]

101

После приёма (Прм) частота и фаза несущей удваиваются в удвоителе частоты (УЧ). В фазовом детекторе (ФД) с данной удвоенной несущей сравнивается синусоидальное напряжение, вырабатываемое генератором (Г2) до тех пор, пока не исчезнут отличия частоты и фазы. Затем в делителе частоты (ДЧ) частота и фаза уменьшаются в два раза, после чего частота совпадает с частотой несущей, а сигнал принимает вид либо $U\cos(\omega t - 0,5\delta)$, либо $U\cos(\omega t + 180^\circ - 0,5\delta)$. После фильтра (Ф1) сигнал имеет положительный знак при передаче «1» и отрицательный при передаче «0».

Фазовращатель (ФВ3) образует ортогональный к выходному сигналу, на основе которого в перемножителе (П2) производится обработка принятого сигнала. И на выходе фильтра (Ф2) получается сигнал, имеющий знак, соответствующий знаку проекции символов на вертикальную ось в «созвездии».

Блок сравнения (БСр) сравнивает текущий символ с предыдущим. В случае их несовпадения на ключ (Кл) подаётся открывающий сигнал, и ключ пропускает напряжение, которое может быть положительным, если фаза генератора (Г2) настроена правильно, и отрицательным, если фаза настроена неправильно. В усреднителе (Уср) данный сигнал усредняется на интервале времени, чтобы снизить влияние шумов.

Если сигнал на выходе усреднителя отрицательный, значит, фаза генератора (Г2) неправильная, и на выходе фильтра (Ф1) вместо передаваемого сигнала выделяется инвертированный сигнал, который через коммутатор (К2) инвертируется (Инв) и подаётся на второй вход коммутатора. Если на выходе усреднителя был положительный сигнал, то коммутатор пропускает сигнал непосредственно с фильтра (Ф1). Таким образом, в любом случае на демодулятор (ДМ) поступит правильный передаваемый сигнал.

Предложенный метод позволяет снизить влияние фазовых ошибок и повысить помехоустойчивость передачи. Потери по сравнению с классическими симметричными "созвездиями" составляют менее 0,04 дБ при значении угла $\delta=10^\circ$, так как расстояние между двумя крайними точками в данном случае составит $1,99U$ вместо $2U$. Это существенно меньше потерь при дифференциальном кодировании (1–3 дБ).

Таким образом, использование асимметричных «созвездий» в фазовой модуляции позволяет отказаться от дифференциального кодирования и повысить надёжность передачи информации без значительных потерь в помехоустойчивости. Применение данного метода перспективно для систем связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / пер. с англ. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
2. Полушин П.А. Исследование влияния шумов приемника на систему фазовой автоподстройки с умножением частоты при использовании фазоманипулированных сигналов / П.А. Полушин, А.Ю. Киселев, В.В. Шалина // Проектирование и технология электронных средств. – 2022. – № 2. – С. 26–29.
3. Патент 208 071 РФ, МПК Н 04 L 27/22. Устройство фазовой автоподстройки системы с фазовой модуляцией / П.А. Полушин, О.Р. Никитин, А.В. Прасолов, С.Ю. Бобрус (РФ), № 2 021 115 631; заявл. 31.05.21; опубл. 01.12.21. Бюл. №34. – 11 с.

УДК 621.375.4

ОБЗОР GAN-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МАЛОШУМЯЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ

***А.Е. Левковский, Г.О. Лунев, Е.В. Михайленко, студенты
г. Томск, ТУСУР***

Приведен обзор схем построения и характеристик монолитных усилителей для различных инженерных задач на основе полупроводниковых материалов арсенида галлия (GaAs) и нитрида галлия (GaN). Описаны различия основных характеристик усилителей в зависимости от схемотехнических решений. Обзор будет полезен студентам и инженерам, занимающимся разработкой СВЧ-устройств.

Ключевые слова: малошумящий усилитель, монолитная интегральная схема, технология, арсенид галлия, нитрид галлия, алмаз.

Развитие полупроводниковых технологий СВЧ-транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС) связано с необходимостью совершенствования различных радиоэлектронных и телекоммуникационных систем СВЧ-диапазона, в первую очередь, систем связи. Например, такие МИС применяются в мобильной связи (4G, 5G), где ключевую роль играют высокий коэффициент усиления и малый показатель шумовых характеристик.

Развитие технологий изготовления МИС СВЧ-усилителей. Как нам уже известно, технологии изготовления МИС развиваются стремительно, что связано с постоянно растущими требованиями к энергоэффективности, размерам кристалла и производительности устройств. Хочется отметить одни из самых основных передовых решений по улучшению свойств МИС:

- развитие и использование материалов, таких как GaN и GaAs, ведь каждый из них имеет свои преимущества и может использоваться для инженерных задач;
- миниатюризация, которая позволяет уменьшить размеры как самих устройств, так и компонентов в них путем объединения тракта усиления и фильтрации, соединив их в одно устройство, что, в свою очередь, позволяет уменьшить потери мощности;
- энергоэффективность, которая играет немаловажную роль. Это особенно необходимо для переносных (мобильных) устройств.

В мире существует множество технологий для производства монолитных интегральных схем (МИС), помимо двух, которые были упомянуты ранее. На рис. 1 представлен сравнительный анализ частотно-мощностных характеристик современных технологий изготовления СВЧ МИС и их применимость в различных устройствах. Как видно из рисунка, каждая технология имеет свои ограничения по мощности и частоте, что требует тщательного выбора материала, соответствующего техническому заданию (ТЗ), для последующего изготовления устройства [1].

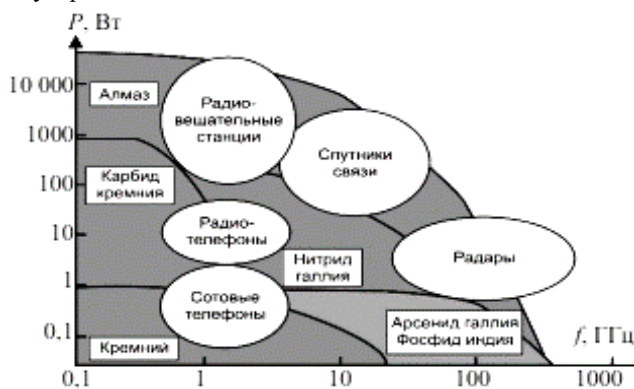


Рис. 1. Технологии изготовления СВЧ МИС

Из данного рисунка следует, что перспективной технологией является алмаз, но так как по данной технологии отсутствуют научные описания и полноценно в производстве никто не использует, в данной статье будут рассмотрены такие технологии, как GaN и GaAs.

Монолитные СВЧ-малошумящие усилители (МШУ) на основе GaAs и GaN. При построении монолитных СВЧ-малошумящих усилителей на основе арсенида галлия (GaAs) и нитрида галлия (GaN) в настоящее время используются так называемые «гибридные схемы», в которых реализованы сразу несколько схмотехнических решений:

с общим истоком, для обеспечения наибольшего коэффициента усиления, так как в таком включении усиление происходит и по току и по напряжению; с обратной связью, для увеличения диапазона рабочих частот; каскадная схема включения позволяет получить высокое усиление (более 15 дБ) с линейным АЧХ во всем частотном диапазоне, минимальный коэффициент шума и т.п. [2].

Для наглядного примера на рис. 2 представлены два малошумящих усилителя (МШУ) X-диапазона, реализованные на GaN- и GaAs-технологиям.

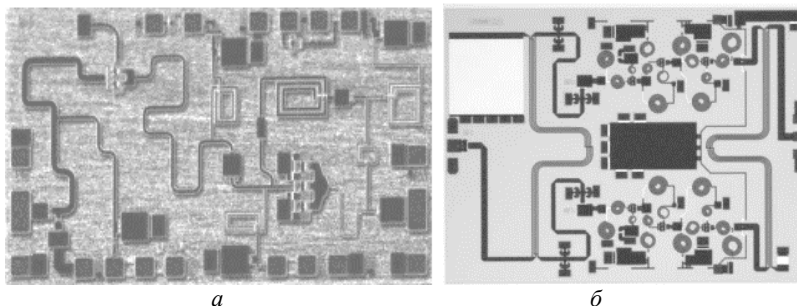


Рис. 2. Микрофотографии МИС малошумящего усилителя, выполненного по технологиям: GaN – *a* [3]; GaAs – *б* [4]

Сравнение характеристик данных усилителей представлено в таблице.

Характеристики МИС МШУ на разных технологиях

Тип процесса	Размер кристалла (мм × мм)	Частотный диапазон, ГГц	S ₂₁ , дБ	Коэфф. шума, дБ
GaAs	3,2×2,4	8–12	< 25	< 2
0,25 GaN	2,1×1,3	8–12	> 23	< 1,6

Закключение. Исходя из описанных в данной статье усилителей и их реализации, можно сделать вывод, что малошумящие усилители на GaN-технологии превосходят GaAs по массогабаритным и шумовым параметрам и максимальной выходной мощностью, что делает GaN более востребованной по сравнению с GaAs.

Перспективы развития: увеличение рабочей частоты до терагерцового диапазона за счет применения гетероструктур на основе алмаза, развитие монолитных интегральных схем (MMIC) с встроенными системами терморегуляции для GaN-усилителей, внедрение квантовых технологий для создания усилителей с предельно низким уровнем шума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайленко В.Е. Обзор GaN-технологий при изготовлении монолитных интегральных схем СВЧ-диапазона / В.Е. Михайленко, А.М. Заболоцкий // Доклады ТУСУР. – 2024. – Т. 27, № 4. – 8 с.
2. Жабин Д.А. Автоматизированный синтез схем и топологий малощумящих СВЧ-транзисторных усилителей на основе генетического алгоритма и параметрических моделей элементов в виде S-параметров: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2017. – 203 с.
3. Yağbasan Çağdaş. Robust X-band GaN LNA with Integrated Active Limiter / Çağdaş Yağbasan, Ahmet Aktuğ // 13th European Microwave Integrated Circuits Conference, 2018. – 4 p.
4. Design of X-band miniature balanced Limiter-Low Noise Amplifier chip / Xin Zhou, Yuanpeng Li, Guo Zhou, Hongtao Wei, Xuebang Gao, Hongjiang Wu // IEEE. – 2018. – 3 p.

УДК 621.391.82

МЕТОД ОЦЕНКИ EVM ПО НЕРАВНОМЕРНОСТЯМ АЧХ И ФЧХ

*С.С. Журавлев, Н.О. Кузьмин, студенты каф. ПИШ;
К.Н. Роцин, аспирант каф. РСС; Е.В. Андронов, аспирант каф. ТУ
г. Томск, ТУСУР, sergei.s.zhuravlev@tusur.ru*

Исследуется влияние неравномерностей АЧХ и ФЧХ передающего тракта на модуль вектора ошибки (EVM) в системах с цифровой модуляцией. Предложен метод оценки EVM, основанный на измерении АЧХ и ФЧХ и расчете отклонений амплитуды и фазы. Проведены измерения фильтра (950–2150 МГц) с модуляцией QAM16, используя генератор, осциллограф (для EVM) и векторный анализатор цепей (для АЧХ и ФЧХ). Моделирование показывает связь неравномерностей и EVM. Расчетное значение EVM отличается от измеренного не более чем на 0,01%.

Ключевые слова: модуль вектора ошибки, неравномерность АЧХ, неравномерность ФЧХ, QAM16, передающий тракт, векторный анализатор цепей.

Растущий спрос на высокоскоростную передачу данных требует внедрения спектрально эффективных модуляций (например, QAM-4096), но повышает требования к линейности АЧХ и ФЧХ. Ключевой показатель качества цифровой модуляции – модуль вектора ошибки (EVM), показывающий отклонение принятого символа от идеального. Низкий EVM означает высокое качество сигнала. Неидеальность компонентов тракта искажает АЧХ и ФЧХ, влияя на EVM. В статье предложен метод оценки влияния неравномерностей АЧХ и ФЧХ на EVM.

EVM может быть оценен через параметры НАЧХ и НФЧХ характеристик передающего тракта. В первом приближении EVM можно рассчитать по следующей формуле:

$$EVM \approx \sqrt{\Delta\alpha_{rms}^2 + [\tan(\Delta\varphi_{rms})]^2},$$

где $\Delta\alpha_{rms}$ – эффективный уровень НАЧХ, $\Delta\varphi_{rms}$ – эффективный уровень НФЧХ.

Эта формула связывает среднеквадратичные пульсации амплитуды и фазы с результирующим значением EVM. Из формулы видно, что вклад фазовых искажений в EVM определяется тангенсом $\Delta\varphi_{rms}$. Это связано с тем, что при малых углах (а $\Delta\varphi_{rms}$, как правило, невелико) $\tan(x) \approx x$. Далее рассмотрим вывод этой формулы и методы расчета $\Delta\alpha_{rms}$ и $\Delta\varphi_{rms}$ на основе измеренных АЧХ и ФЧХ.

НАЧХ означает, что коэффициент передачи тракта (и, следовательно, амплитуда сигнала) меняется в зависимости от частоты. Для количественной оценки этой неравномерности в пределах заданной полосы частот B (f_1 до f_2) используется среднеквадратичное отклонение (СКО) амплитуды от её среднего значения.

Сначала определим среднее значение АЧХ в полосе B :

$$\Delta\alpha_{rms} = \sqrt{\frac{1}{B} \int_{f_1}^{f_2} [\alpha(f) - \alpha_{rms}]^2 df},$$

где $\alpha(f)$ – АЧХ ИУ, выраженная в размах; $B = f_2 - f_1$ – ширина полосы частот, в которой производится анализ; α_{rms} – среднее (по спектру, в пределах полосы B) значение модуля АЧХ, выраженное в размах.

Затем рассчитывается среднеквадратичная пульсация амплитуды

$$\alpha_{rms} = \sqrt{\frac{1}{B} \int_{f_1}^{f_2} \alpha(f)^2 df}.$$

Эта величина показывает, насколько сильно в среднем АЧХ отклоняется от своего среднего значения в заданной полосе частот. Чем больше $\Delta\alpha_{rms}$, тем больше НАЧХ и тем больший вклад она вносит в EVM.

Нелинейная зависимость фазового сдвига от частоты (НФЧХ) искажает сигнал. Для оценки влияния НФЧХ на EVM нужно исключить линейную составляющую фазового сдвига (групповую задержку), не искажающую форму.

Для этого строится линеаризованная ФЧХ, $\varphi_{lin}(f)$, которая представляет собой прямую линию, аппроксимирующую реальную ФЧХ, $\varphi(f)$, методом наименьших квадратов (МНК). Уравнение линеаризованной ФЧХ

$$\varphi_{lin}(f) = a \cdot f + b.$$

Коэффициенты a и b находятся из условия минимизации средне-квадратичного отклонения $\varphi(f)$ от $\varphi_{lin}(f)$ и определяются по следующим формулам:

$$\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i; \quad \bar{\varphi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi(f_i); \quad a = \frac{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})(\varphi(f_i) - \bar{\varphi})}{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2}; \quad b = \bar{\varphi} - a\bar{f},$$

где $\varphi(f)$ – ФЧХ ИУ, выраженная в радианах, f_i – дискретные значения частоты, на которых измерена ФЧХ, N – количество точек измерения ФЧХ, $\bar{f}$ – среднее значение частоты в рассматриваемом диапазоне, $\bar{\varphi}$ – среднее значение фазы в рассматриваемом диапазоне.

После определения линейаризованной ФЧХ рассчитывается средне-неквадратичная пульсация фазы ($\Delta\varphi_{rms}$):

$$\Delta\varphi_{rms} = \sqrt{\frac{1}{B} \int_{f_1}^{f_2} [\varphi(f) - \varphi_{lin}(f)]^2 df}.$$

Для проверки метода собрали установку (рис. 1) с полоснопропускающим фильтром (ИУ, 950–2150 МГц). Генератор Keysight N5172B создавал сигнал QAM16 (100 МГц), чувствительный к искажениям АЧХ/ФЧХ. Осциллограф Keysight MXR054A с модулем VSA измерял EVM и спектр сигнала (усреднение по 50 измерениям). В табл. 1 – результаты измерений EVM, ошибок амплитуды и фазы фильтра. В табл. 2 – EVM кабельной сборки (без ИУ) для калибровки.

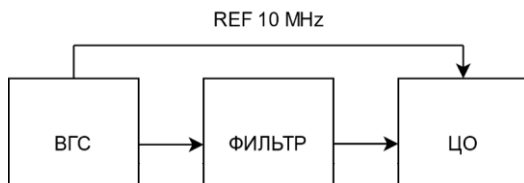


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки

Таблица 1

**Измеренные значение EVM, Magnitude error, Phase error,
Frequency error для ИУ и кабельной сборки**

Частота, МГц	950	1050	1150	1250	1350	1450	1550	1650	1750	1850	1950	2050	2150
EVM, %	5,34	8,51	6,13	3,84	5,49	3,95	2,23	2,87	2,89	2,45	3,29	2,82	4,01
Ошибка ампл., %	3,78	5,96	4,30	2,69	3,86	2,81	1,58	2,04	2,05	1,73	2,33	1,98	2,81
Ошибка фазы, град	4,07	6,48	4,67	2,88	4,13	2,94	1,65	2,19	2,14	1,83	2,46	2,15	3,03

Таблица 2

**Измеренные значение EVM,
ошибок амплитуды и фазы для кабельной сборки**

Частота, МГц	950	1500	2000
EVM, %	6,5024	2,4321	2,5289
Ошибка амплитуды, %	4,5701	1,712	1,7953
Ошибка фазы, град.	4,8795	1,8289	1,881

Средние EVM по табл. 1 и 2: 4,14 и 3,82% (разница 0,32%). АЧХ и ФЧХ ИУ измерены ВАЦ и импортированы в MatLab. Рассчитаны пульсации $\Delta\alpha_{rms}$ (0,0415) и $\Delta\phi_{rms}$ (0,3199) и EVM (0,3339%). Измеренное и расчетное EVM близки.

Предложен метод расчета EVM по АЧХ и ФЧХ для фильтра (950–2150 МГц) с QAM16 (100 МГц). EVM измерен в 13 точках (шаг 100 МГц), а также отдельно для кабеля. EVM фильтра и кабеля (ВГС и ЦО): 4,14 и 3,82% (разница 0,32%), а расчетный EVM (по данным ВАЦ) – 0,3339%. Результаты хорошо согласуются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proakis J.G. Digital Communications / J.G. Proakis, M. Salehi. – 5th ed. – McGraw-Hill, 2008 [Электронный ресурс]. – URL: https://books.google.ru/books?id=tOpKAQAACAAJ&redir_esc=y (дата обращения: 05.05.2025).
2. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. – 2nd ed. – Prentice Hall, 2001 [Электронный ресурс]. – URL: <https://drive.google.com/file/d/0B42R6NUvjMKxUGhKYkstRGVaVku/view?pli=1&resourcekey=0sDgs2xFGRgNOQP-WFnn9Gg> (дата обращения: 05.05.2025).
3. Rohde & Schwarz. Error Vector Magnitude (EVM) Measurement. – White Paper, 2021 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/error-vector-magnitude-evm-measurement-white-paper_231246-15515.html (дата обращения: 05.05.2025).
4. Understanding EVM, and How it Affects Performance, 8 Hints. Application Note // Keysight Technologies. – 2020 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06958/application-notes/5992-4035.pdf> (дата обращения: 05.05.2025).

ПОДСЕКЦИЯ 1.4

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

*Председатель – Курячий М.И., проф. каф. ТУ, к.т.н., с.н.с.
зам. председателя – Каменский А.В., доцент каф. ТУ, к.т.н.*

УДК 004.932

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОТСЛЕЖИВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ВХОДНОМУ ВИДЕОПОТОКУ

Д.М. Батенко, студент каф. ТУ

*Научный руководитель В.В. Капустин, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, dmbatenko@mail.ru*

Проведен сравнительный анализ классического метода обнаружения особых точек ORB, а также нейросетевого метода отслеживания объектов по входному видеопотоку. Исследуется эффективность работы данных подходов при изменении размеров объекта.

Ключевые слова: объекты интереса, особые точки, ORB, трекинг, BFMatcher, нейронные сети, YOLO.

Автоматическое отслеживание движений множества объектов по видеопотоку является одной из ключевых задач современных систем машинного зрения. Данная задача включает в себя этапы обнаружения объектов, их классификации, отслеживания и управления траекториями движения. Применение таких систем охватывает широкий спектр областей: от видеонаблюдения и анализа перемещений людей до автономных транспортных средств и спортивных технологий.

Целью работы является сравнение классического и нейросетевого алгоритмов для отслеживания объектов на изображениях по выбранной области интереса. Результаты исследований можно использовать при выборе метода отслеживания объектов.

Для обнаружения объектов разных масштабов с помощью нейросетевого метода используются глубокие карты признаков разных конволюционных слоев. Структуру сети можно условно разделить на две части: основная подсеть для извлечения глубоких карт признаков и подсеть для прогнозирования на основе карт признаков различных масштабов, местонахождения целевых объектов. Заключительные сверточные слои сети объединяют предсказания по всем

масштабам карт признаков, после чего применяется алгоритм подавления немаксимумов для формирования окончательных гипотез о местонахождении искомого объекта [1].

Сопоставление шаблонов – классический метод распознавания образов, использующий образец или шаблон для поиска объектов на изображении. Метод требует исходного изображения (например, снимка с камеры) и шаблона. Шаблон накладывается на изображение и перемещается попиксельно слева направо и сверху вниз. В каждом положении вычисляется метрика совпадения, заносимая в матрицу R. После завершения поиска лучшие совпадения определяются как глобальные минимумы или максимумы [2].

Разработка алгоритма выполнялась с использованием графического дизайнера Qt Designer, языка Python [3] и библиотеки OpenCV [4]. Для нейросетевого метода отслеживания была использована модель YOLO v8. Под классическим методом подразумевается нахождение особых точек на видеопотоке с использованием метода ORB, а затем отслеживание с помощью трекера BFMatcher. В качестве оценки эффективности изменялся размер отслеживаемого объекта.

Интерфейс разделен на две вкладки для выбора метода отслеживания. В классическом методе предусмотренно окно для вывода видеоряда, три информационных поля (количество точек в кадре, количество точек в области интереса и дистанция до объекта), а также две кнопки для запуска видеопотока и начала отслеживания. Дополнительно доступны проверка вывода особых точек и выбор метода их построения. Для нейросетевого метода реализованно окно видеоряда, два информационных поля (номер кадра и точность обнаружения объекта) и две кнопки управления.

Разработаны два метода: классический для определения особых точек и отслеживания объектов по видеопотоку, а также нейросетевой метод их отслеживания. Пример работы классического метода при отслеживании большого объекта показан на рис. 1, аналогичный пример для малого объекта представлен на рис. 2.

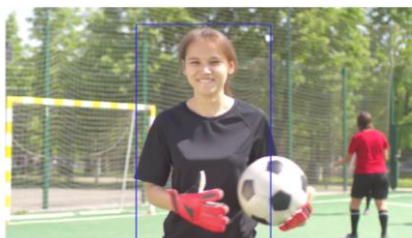


Рис. 1. Работа классического метода при отслеживании большого объекта



Рис. 2. Работа классического метода при отслеживании малого объекта

Работа нейросетевого метода при отслеживании большого объекта приведена на рис. 3. Работа нейросетевого метода при отслеживании малого объекта приведена на рис. 4.

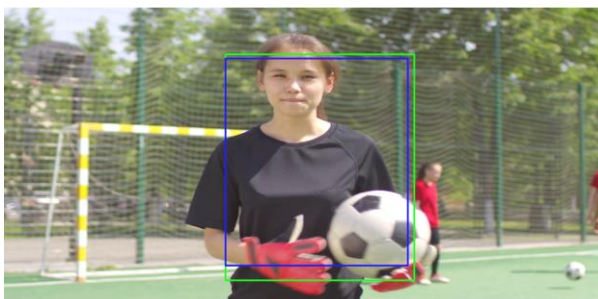


Рис. 3. Работа нейросетевого метода при отслеживании большого объекта



Рис. 4. Работа нейросетевого метода при отслеживании малого объекта

Результаты сравнений представлены на рис. 5–8.

При отслеживании объектов классический метод требует в среднем 0,16 с на кадр для большого объекта и 0,06 с для малого. Нейросетевой метод обрабатывает кадры с большими и малыми объектами за 0,09 и 0,08 с соответственно.

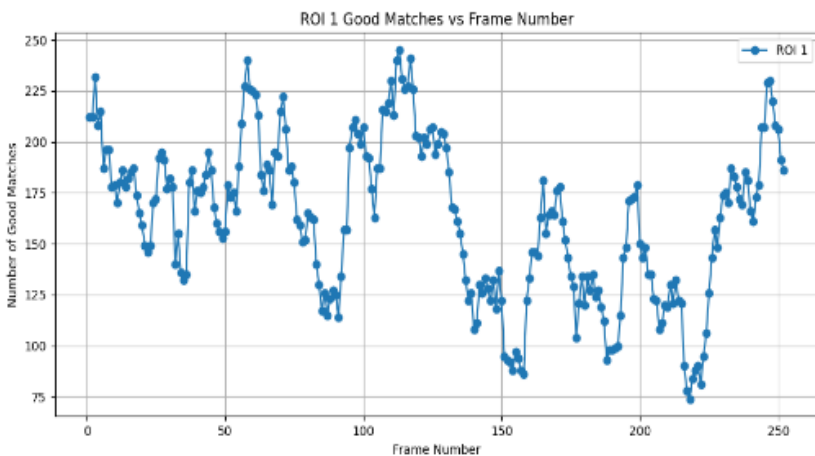


Рис. 5. График зависимости количества особых точек на кадре от номера кадра для классического метода при отслеживании большого объекта

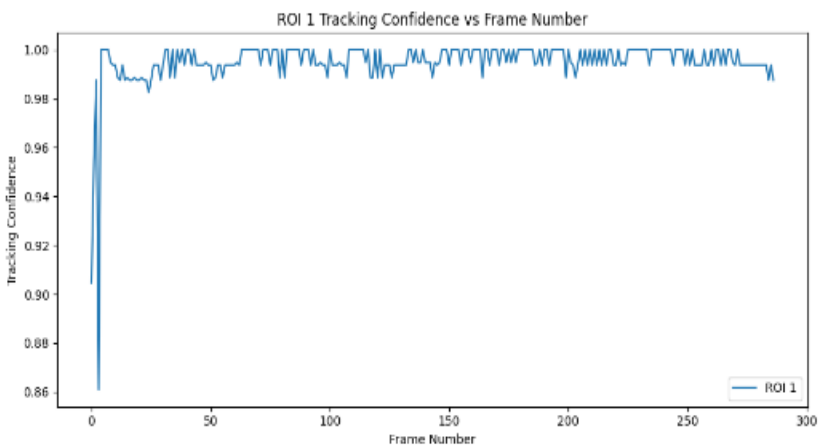


Рис. 6. График зависимости точности отслеживания для нейросетевого метода при отслеживании большого объекта

Исследование показало, что нейросетевой метод более эффективен, но требователен к вычислительным ресурсам и нуждается в предварительном обучении на больших данных. Классические методы лучше подходят для простых задач или ситуаций, где требуется быстрое развертывание без обучения моделей. Таким образом, выбор метода зависит от конкретных условий, доступных ресурсов и поставленной задачи.

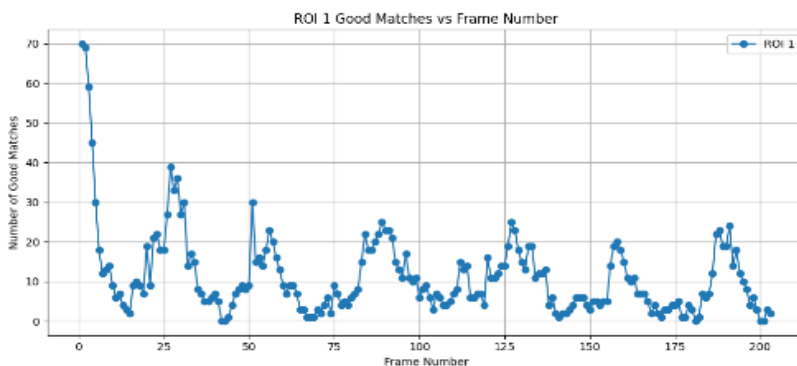


Рис. 7. График зависимости количества особых точек на кадре от номера кадра для классического метода при отслеживании малого объекта

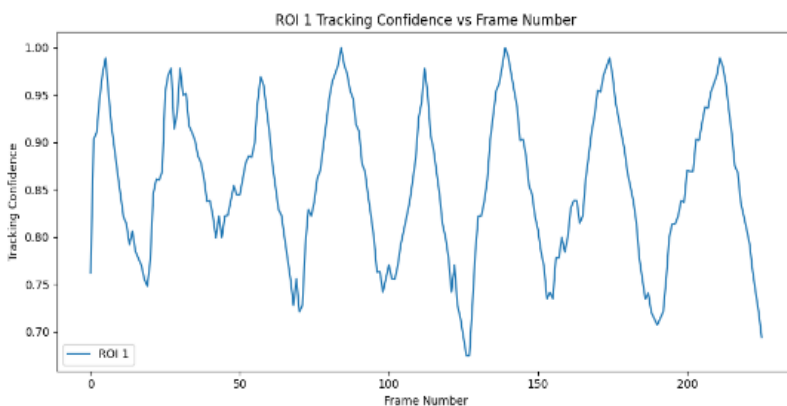


Рис. 8. График зависимости точности отслеживания для нейросетового метода при отслеживании малого объекта

ЛИТЕРАТУРА

1. Визильтер Ю.В. Одноэтапный детектор лиц и особых точек на изображениях / Ю.В. Визильтер, В.С. Горбацевич, А.С. Моисеенко // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 4. – С. 589–595. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-674.
2. Буряченко В.В. Методы слежения за объектами с применением глубокого обучения / В.В. Буряченко, А.И. Пахирка // Сибирский журнал науки и технологий. – 2020. – С. 150–154.
3. Основы языка Python 3: синтаксис, операторы, циклы, функции, переменные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pythonru.com/основу>
4. OpenSource Computer Vision [Электронный ресурс]: – URL: https://docs.opencv.org/4.x/d6/d00/tutorial_py_root.html

ПОДСЕКЦИЯ 1.5

СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ И ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

*Председатель – Рогожников Е.В., зав. каф. ТОР, к.т.н.;
зам. председателя – Дмитриев Э.М., ст. преп. каф. ТОР*

УДК 004.75

РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННОГО РЮКЗАКА ДЛЯ БОЛЕЕ УДОБНОЙ, БЕЗОПАСНОЙ И ОРГАНИЗОВАННОЙ ЖИЗНИ СТУДЕНТОВ ТУСУРа

*Д.А. Вычужанин, Е.Ф. Замерчук, Н.В. Котюков,
В.А. Курандин, Е.Е. Халтурин, Р.О. Хушкадамов, студенты*

Научный руководитель А.М. Исаков, ст. преп. каф. АСУ

*Проект ГПО АСУ-2410. Разработка инновационного рюкзака для
более удобной, безопасной и организованной жизни студентов ТУСУР
г. Томск, каф. АСУ, aleksandr.m.isakov@tusur.ru*

Рассматриваются необходимые показатели рюкзака, выбирается платформа для разработки приложения, описывается функционал приложения и способ взаимодействия между приложением и рюкзаком. Описана примерная архитектура приложения.

Ключевые слова: инновационный рюкзак, датчики, мобильное приложение, RFID-метки, геолокация, Arduino, Qt, Bluetooth.

Инновационный рюкзак – интересный и современный проект, направленный на улучшение удобства и безопасности для учеников или студентов. С помощью датчиков, включенных в рюкзак, будет происходить взаимодействие с приложением на телефоне. Приложение будет предоставлять различные показатели рюкзака и связанные с ними данные, например такие, как геолокация рюкзака, список находящихся в нем предметов (с помощью меток на учебниках и тетрадах), вес, заряд рюкзака и другие показатели. Связь между рюкзаком и приложением будет происходить по Bluetooth и встроенный в рюкзак модуль Arduino [1], обеспечивающий сбор и передачу данных с датчиков.

Для реализации программной компоненты данного решения была выбрана кроссплатформенная среда разработки Qt [2]. Данная платформа характеризуется широкими возможностями создания как графических пользовательских интерфейсов, так и логики взаимодей-

ствия с внешними устройствами. Qt предоставляет расширенный набор инструментов для работы с сетевыми протоколами, беспроводными технологиями (включая Bluetooth), базами данных и другими компонентами, что делает ее оптимальным выбором для подобных проектов. В рамках текущего проекта планируется разработка приложения для операционной системы Android, которое будет обеспечивать полный функционал управления и анализа данных, получаемых от рюкзака.

В ходе разработки будет создана архитектура приложения (рис. 1).

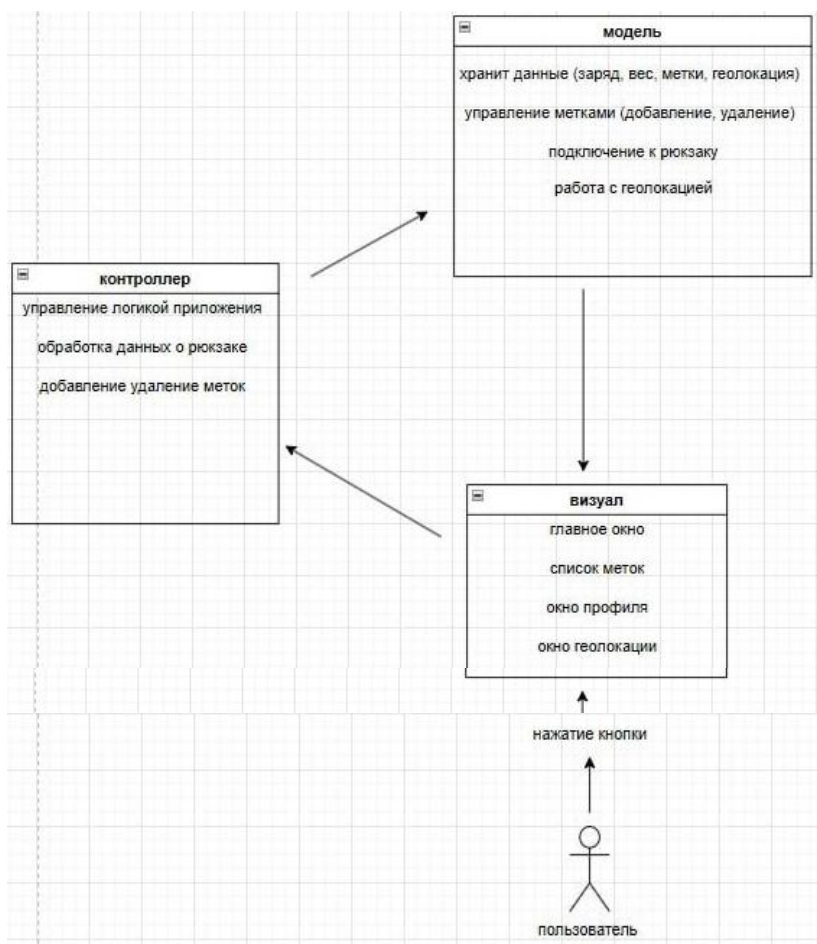


Рис. 1. Архитектура приложения

При первом запуске приложения появляется возможность зарегистрироваться (или кнопка для выполнения этого пункта позже), сменить язык (русский/английский) и добавить RFID-метки [3], затем будет главное меню, показатель заряда рюкзака и экран настроек, где пользователь может добавлять новые RFID-метки для вещей, устанавливать значение предельного веса, определять геолокацию, настраивать профиль, менять тему (светлая/темная) приложения и изменять другие дополнительные настройки.

Техническая реализация проекта включает использование Arduino для управления датчиками внутри рюкзака и передачи данных через Bluetooth. Датчики веса помогут контролировать нагрузку на спину пользователя и исключить возможные проблемы со здоровьем. RFID-чипы позволяют точно отслеживать наличие каждого предмета в рюкзаке, а GPS-модуль обеспечивает точное определение местоположения. Все собранные данные обрабатываются приложением, написанным на QT, и отображаются через удобный пользовательский интерфейс.

Предлагаемое приложение может помочь школьникам или студентам не терять и не забывать свои вещи, уменьшить нагрузку на спину за счет датчиков контроля веса, а также сохранить спокойствие родителей, которые могут не волноваться по поводу того, где находится их ребенок и всё ли он взял с собой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Официальный сайт Arduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.arduino.cc/index.php>, свободный (дата обращения: 06.03.2025).
2. Официальный сайт Qt [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qt.io>, свободный (дата обращения: 06.03.2025).
3. Что такое RFID метки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.1cbit.ru/blog/rfid-metki-chto-eto-takoe-kak-rabotaet-vidy-i-tipy-identifikatsii/>, свободный (дата обращения: 06.03.2025).

УДК 621.396.96

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПОИСКА ПОТЕРЯВШЕГОСЯ ЧЕЛОВЕКА В ЛЕСНОМ МАССИВЕ

И.В. Гридин, Н.А. Иванников, студенты каф. ПИШ

*Научный руководитель Е.В. Рогожников, доцент каф. ПИШ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, vanyagridin2001@bk.ru, ivannikoy0201@mail.ru*

Представлены разработка программного обеспечения для связи между БПЛА и наземным пунктом управления (НПУ), а также про-

граммное обеспечение для отображения информации искомого абонента и контроля БПЛА с помощью оффлайн-карты.

Ключевые слова: ПО, LoRa, БПЛА, НПУ, BladeRF, RSSI, программа.

Существует проблема, когда необходимо найти потерявшегося человека в лесном массиве с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также в реальном времени отображать текущее местоположение БПЛА на карте и точно указывать местонахождение найденного человека. Задача исследователя состоит в том, чтобы разработать программное обеспечение для обмена данными между бортовой системой БПЛА и наземным пунктом управления (НПУ), а также, используя алгоритмы обработки данных и визуализации, обеспечить точное отображение маршрута БПЛА и автоматическую установку метки на карте в момент обнаружения человека, учитывая возможные помехи и ограничения связи в лесной местности.

Рассмотрено специализированное ПО для организации надежного канала передачи данных между БПЛА и НПУ. В качестве технического решения предлагается использование приемопередающих модулей LoRa, характеризующихся высокой энергоэффективностью и дальностью действия [1]. Кроме того, описана разработка программного обеспечения для имитатора базовой станции, представляющего собой портативное определяемое радио BladeRF.

На начальном этапе исследования была разработана программа, реализующая приём и передачу данных между БПЛА и НПУ с помощью приемопередающих модулей LoRa.

Ниже описана блок-схема разработанного ПО (рис. 1).

ПО предназначено для организации надёжного обмена данными между узлами сети с использованием беспроводной связи. Оно обеспечивает управление процессом передачи и приёма сообщений, обработку входящих данных, а также диагностику работы системы через интерфейс взаимодействия с компьютером. Основные функции включают инициализацию компонентов связи, определение роли узлов в сети, циклическое выполнение операций отправки и получения данных, мониторинг состояния операций и вывод результатов на внешнее устройство.

Тем самым выполнена настройка приемопередающих модулей LoRa, что позволит передавать данные телеметрии имитатора базовой станции (БС) между БПЛА и НПУ.

Далее разработано ПО для отображения на карте БПЛА, НПУ и местоположения потерявшегося человека после того, как имитатор

БС, установленный на БПЛА, проведет детектирование сигнала мобильного устройства.



Рис. 1. Блок-схема разработанного ПО

На рис. 2 изображена блок-схема данного ПО.



Рис. 2. Блок-схема программного обеспечения

обеспечивающих высокую дальность действия и низкое энергопотребление. Это решение позволяет эффективно передавать данные телеметрии и обеспечивать точное отслеживание положения БПЛА на карте. Также в работе предложены алгоритмы обработки данных и визуализации, которые позволяют автоматически устанавливать метки на карте в случае обнаружения потерявшегося человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Miralles Nogués S. Implementation of a LoRa mesh library: дис. ... канд. техн. наук. – Universitat Politècnica de Catalunya, 2021.
2. Cuomo F. et al. EXPLoRa: Extending the performance of LoRa by suitable spreading factor allocations // 2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). – IEEE, 2017. – С. 1–8.
3. Automate the Boring Stuff with Python [Электронный ресурс]. – Automate the Boring URL: <https://automatetheboringstuff.com/> (дата обращения: 17.10.2024).
4. Haversine formula [Электронный ресурс]. – Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Haversine_formula (дата обращения: 15.11.2024).

УДК 004.7

MQTT КАК ОСНОВА ПОСТРОЕНИЯ МУЛЬТИТЕХНОЛОГИЧНЫХ ИОТ-СИСТЕМ: ИНТЕГРАЦИЯ С ДРУГИМИ ПРОТОКОЛАМИ И СЕРВИСАМИ

В.И. Горохов, А.Д. Рязанов, студенты каф. КСУП

*Научный руководитель Е.А. Потапова, ст. преп. каф. КСУП
Проект ГПО КСУП-1904. Разработка приложений для Android
г. Томск, ТУСУР, vova-gorohov04@mail.ru*

Рассматривается протокол MQTT как ключевой элемент для построения гибридных систем интернета вещей, включающих различные протоколы и сервисы. Проведён анализ основных преимуществ интеграции MQTT с CoAP, REST и OPC UA, а также рассмотрены аспекты масштабирования и безопасности.

Ключевые слова: MQTT, интернет вещей, CoAP, REST, OPC UA, масштабирование, безопасность.

В связи с расширением сферы применения интернета вещей (IoT) и усложнением систем, объединяющих различные типы устройств и платформ, возникает задача выбора универсального и надёжного протокола обмена данными [1]. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) завоевал популярность благодаря низким накладным расходам, простоте реализации и эффективному использованию сетевых

ресурсов, что особенно актуально при проектировании мультитехнологичных IoT-решений [2]. Однако при интеграции MQTT с другими протоколами и сервисами (CoAP, REST, OPC UA и др.) необходима разработка концептуальной архитектуры, обеспечивающей масштабирование, высокую производительность и безопасность.

Экспериментальная среда и результаты работы. Для оценки эффективности использования MQTT в мультитехнологичных IoT-системах была развернута тестовая среда на базе персонального компьютера со следующими характеристиками: процессор AMD Ryzen 7 7700 (8 ядер, 3,8 ГГц), 32 ГБ оперативной памяти, операционная система Windows 11.

В качестве инструментов для нагрузочного тестирования использовались утилиты JMeter для REST, самописный скрипт на Python с библиотеками `raho-mqtt` для MQTT и `aiocoap` для CoAP, а также `open62541` для OPC UA. Каждая серия тестов повторялась не менее пяти раз для сглаживания статистических выбросов. Параметры измерений:

- средняя задержка считалась по времени от отправки запроса до получения ответа на прикладном уровне;
- пропускная способность определялась количеством обработанных сообщений за одну секунду (сообщения небольшого размера ~200 байт).

Полученные усреднённые результаты представлены в таблице.

Сравнительные показатели пропускной способности и задержек

Протокол	Средняя задержка, мс	Пропускная способность, сообщений/с
MQTT	15	1200
CoAP	20	900
REST	35	750
OPC UA	50	600

Из данных таблицы видно, что MQTT демонстрирует наименьшую задержку и наиболее высокую пропускную способность в сравнении с другими протоколами, что подтверждает его эффективность в качестве «центральной шины» сообщений.

Анализ полученных результатов. Результаты экспериментов показывают, что использование MQTT в качестве центрального звена упрощает масштабирование системы: можно легко добавлять новые брокеры и балансировщики нагрузки, чтобы обрабатывать большие объёмы трафика [3]. При этом важно учитывать ряд факторов:

1. *Безопасность.* Стандартный MQTT не обеспечивает сквозное шифрование, поэтому рекомендуется использование TLS/SSL для защиты канала, а также внедрение механизмов аутентификации и авторизации (например, OAuth 2.0) [4].

2. *Интеграция с промышленными протоколами.* OPC UA, Modbus и другие решения могут взаимодействовать с MQTT-брокером через специализированные шлюзы или адаптеры, что обеспечивает совместимость на аппаратном уровне.

3. *Учёт ограничений устройств.* При интеграции протоколов с MQTT важно корректно настраивать параметры QoS (качество обслуживания) и Retain (сохранение сообщений), чтобы избежать перегрузки ресурс-ограниченных узлов.

4. *Гибкость и масштабирование.* Мультитехнологичная архитектура требует чёткой организации взаимодействия между различными сервисами. REST-сервисы могут предоставлять удобные методы для внешних приложений, а CoAP-устройства продолжают эффективно работать в локальных сетях с низкой пропускной способностью.

Таким образом, интеграция MQTT с другими протоколами и сервисами даёт возможность создать единую экосистему, охватывающую как миниатюрные датчики с низким энергопотреблением, так и высокопроизводительные промышленные контроллеры, а также облачные платформы для аналитики больших данных. Достигается единообразие обмена сообщениями, упрощается администрирование и повышается надёжность IoT-системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cirani S. Internet of Things: Architectures, Protocols and Standards / S. Cirani, G. Ferrari, M. Picone – John Wiley & Sons. – 2018. – 320 p.

2. Официальная спецификация MQTT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mqtt.org/documentation> (дата обращения: 10.03.2025).

3. Наумов В.А. Технологии интернета вещей // Наука, технологии и бизнес – 2021: сб. матер. III межвуз. конф. аспирантов, соискателей и молодых учёных – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – С. 45–51.

4. Dali M. Securing MQTT Communications in IoT: A Survey / M. Dali, F. Naït-Abdesselam // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, No. 2. – P. 122–138.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ LPWAN ДЛЯ ИОТ

Б.С. Леицинский, адъюнкт; Н.А. Васильев, с.н.с.;

Д.С. Ситдииков, м.н.с.

г. Санкт-Петербург, Военная академия связи, dnr_1910@mail.ru

Проводится сравнительный анализ технологий LPWAN, таких как Sigfox, LoRa и LTE-M, которые активно используются в интернете вещей (IoT). Рассматриваются их ключевые характеристики, включая дальность связи, энергопотребление, пропускную способность и стоимость внедрения. Особое внимание уделено применимости каждой технологии в различных сценариях.

Ключевые слова: LPWAN, IoT, Sigfox, LoRa, LTE-M, беспроводные сети, энергопотребление, дальность связи, пропускная способность, умные города.

С развитием технологий интернета вещей (IoT) все больше устройств требуют надежной и энергоэффективной связи для передачи данных на большие расстояния. Это особенно важно для таких сфер, как умные города, промышленность, сельское хозяйство и логистика, где устройства часто работают в удаленных или труднодоступных местах. В таких условиях технологии LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) становятся ключевым решением [5], обеспечивая низкое энергопотребление и широкое покрытие при минимальных затратах.

Однако разнообразие LPWAN-технологий, таких как Sigfox, LoRa и LTE-M, ставит перед разработчиками сложный выбор. Каждая из этих технологий имеет свои уникальные характеристики, преимущества и недостатки, которые определяют их применимость в различных сценариях.

Цель данной статьи – провести сравнительный анализ этих технологий, выделить их ключевые особенности и дать рекомендации по выбору в зависимости от требований конкретных проектов. Задачи исследования включают:

1. Систематизацию ключевых характеристик каждой технологии.
2. Сравнение их по таким параметрам, как дальность связи, энергопотребление, пропускная способность и стоимость внедрения.
3. Оценку применимости технологий в конкретных сферах, таких как умные города, промышленный IoT и сельское хозяйство.

Технология Sigfox [1] – технология, использующая узкополосную модуляцию для передачи данных. Она работает в нелицензируемом спектре частот (868 МГц в Европе, 902 МГц в США).

К преимуществам можно отнести: низкое энергопотребление – устройства могут работать до 10 лет от одной батареи; простоту развертывания – инфраструктура сети управляется оператором, что упрощает интеграцию; наличие глобального покрытия – Sigfox доступен в более чем 70 странах.

К недостаткам следует отнести: ограниченную пропускную способность – передача до 140 сообщений в день, каждое из которых не превышает 12 байт; зависимость от оператора – пользователи не могут развернуть собственную сеть; ограниченную гибкость – отсутствие поддержки двусторонней связи в реальном времени.

Технология LoRa [2, 3] – технология, основанная на чипсетах Semtech, использующая широкополосную модуляцию для передачи данных. LoRaWAN – это протокол, работающий поверх LoRa.

К преимуществам можно отнести: гибкость – возможность развертывания частных сетей; дальность связи – до 15 км в сельской местности и 2–5 км в городах; поддержку двусторонней связи.

К недостаткам следует отнести: ограниченную пропускную способность – до 50 кбит/с; сложность управления сетью в крупных развертываниях; зависимость от качества антенн и рельефа местности.

Технология LTE-M [4] – технология, основанная на стандартах сотовой связи 4G/LTE, оптимизированная для IoT-устройств.

К преимуществам можно отнести: высокую пропускную способность – до 1 Мбит/с; низкую задержку – подходит для приложений, требующих быстрого отклика; наличие глобального покрытия – использует инфраструктуру сотовых операторов.

К недостаткам следует отнести: более высокое энергопотребление по сравнению с Sigfox и LoRa; зависимость от операторов сотовой связи; более высокую стоимость оборудования и подписки. Сравнительная характеристика технологии беспроводной связи представлена в таблице.

Сравнительная характеристика LPWAN для IOT

Параметр	Sigfox	LoRa (LoRaWAN)	LTE-M
Дальность связи	До 50 км	До 15 км	До 10 км
Пропускная способность	Очень низкая (12 байт/сообщение)	Низкая (до 50 кбит/с)	Высокая (до 1 Мбит/с)
Энергопотребление	Очень низкое	Низкое	Среднее
Стоимость	Низкая	Средняя	Высокая
Гибкость	Низкая	Высокая	Средняя
Мобильность	Ограниченная	Ограниченная	Высокая

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы.

Sigfox идеально подходит для приложений, где требуется минимальное энергопотребление и передача небольших объемов данных. Однако ограниченная пропускная способность и зависимость от оператора делают эту технологию менее гибкой для сложных сценариев.

LoRa (LoRaWAN) предлагает баланс между дальностью связи, энергопотреблением и гибкостью. Эта технология хорошо подходит для умных городов, сельского хозяйства и промышленного IoT. Возможность развертывания частных сетей делает LoRa привлекательной для крупных проектов.

LTE-M выделяется высокой пропускной способностью и низкой задержкой, что делает ее идеальной для приложений, требующих быстрого отклика и передачи больших объемов данных. Однако более высокая стоимость и энергопотребление ограничивают ее применение в проектах с жесткими бюджетными ограничениями.

Был проведен сравнительный анализ трех популярных технологий LPWAN – Sigfox, LoRa и LTE-M. Каждая из этих технологий имеет свои уникальные преимущества и недостатки, что делает их применимыми в различных сценариях использования. Sigfox идеально подходит для простых приложений с низким энергопотреблением и минимальными требованиями к передаче данных. LoRa (LoRaWAN) предлагает гибкость и возможность развертывания частных сетей, что делает её популярной для умных городов и промышленного IoT. LTE-M, в свою очередь, обеспечивает высокую пропускную способность и низкую задержку, что важно для мобильных и требовательных приложений.

Выбор технологии зависит от конкретных требований проекта, таких как дальность связи, объем передаваемых данных, энергопотребление и бюджет. В будущем развитие стандартов, таких как 5G и NB-IoT, может расширить возможности LPWAN, обеспечивая еще более эффективные решения для IoT.

ЛИТЕРАТУРА

1. Petrariu A.I. Sigfox wireless communication enhancement for internet of things: A study / A.I. Petrariu, A. Iavric // 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). – IEEE, 2021. – P. 1–4.
2. Islam R. et al. LoRa and server-based home automation using the internet of things (IoT) // Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences. – 2022. – Vol. 34, No. 6. – P. 3703–3712.
3. Карманов А.А. Технология LoRa как средство цифровой радиотелеметрии для IoT-устройств / А.А. Карманов, А.А. Савостин // Вестник Северо-Казахстанского ун-та им. М. Козыбаева. – 2023. – № 1 (57). – С. 100–106.

4. Garbhapu V.V. LTE-M for IoT Healthcare-Regression or Adaptation? / V.V. Garbhapu, S. Gopalan // 2023 IEEE AFRICON. – IEEE, 2023. – С. 1–3.

5. Islam M. et al. Future industrial applications: Exploring lpwan-driven iot protocols // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 8. – P. 2509.

УДК 621.391.1

ИНТЕГРАЦИЯ ИОТ-ТЕХНОЛОГИЙ И TELEGRAM-БОТА ДЛЯ УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ХОЛОДИЛЬНЫХ КАМЕР

Д.А. Зырянов, студент ИШИТР, ТПУ

Научный руководитель А.И. Кочегуров, доцент ОИТ ИШИТР, к.т.н.

г. Томск, НИ ТПУ, daz45@tpu.ru

Разработана автономная система мониторинга температурного режима холодильных камер на базе IoT-технологий с локальным хранением данных. Решение включает датчики DS18B20, микроконтроллер с модулем Wi-Fi ESP8266 и Telegram-бот для оповещения о критических отклонениях. Локальное хранение данных на SD-карте обеспечивает независимость от внешних сервисов, повышает безопасность и снижает эксплуатационные затраты. Результаты испытаний показали надежность системы при отсутствии интернет-соединения и сокращение времени доступа к данным до 2 с.

Ключевые слова: Интернет вещей, локальное хранение, ESP8266, Telegram-бот, энергоэффективность.

В условиях ограниченной доступности стабильного интернет-соединения на промышленных объектах актуальность решений с локальным хранением данных возрастает. Предлагаемая система устраняет зависимость от облачных сервисов, обеспечивая автономность работы и сохранность данных. Это особенно важно для предприятий, где требования к безопасности информации и отказоустойчивости критичны.

Архитектура системы. Система реализована по децентрализованной схеме (рис. 1). Основные компоненты:

- датчики DS18B20 с погрешностью $\pm 0,5$ °C, подключенные по интерфейсу 1-Wire;
- модулем Wi-Fi ESP8266 для передачи данных;
- локальное хранилище на SD-карте (формат FAT32) с частотой записи 1 раз в 5 мин;
- telegram-бот для уведомлений через локальный HTTP-сервер.

Резервирование реализовано через дублирование файлов на вторую SD-карту. Пример хранения данных на SD-карте представлен в таблице.

Сохраненные данные в формате CSV

Дата	Время	ID датчика	Температура, °C
2024-05-30	14:05:02	28FF1234	–18,5



Рис. 1. Структурная схема работы автономной системы мониторинга

Беспроводная передача данных. Модуль ESP8266 работает в режиме SoftAP (точка доступа), создавая локальную сеть для связи с дашбордом оператора.

Параметры модуля ESP8266:

- диапазон частот: 2,4 ГГц;
- максимальное число подключений: 5 устройств;
- шифрование: WPA2-PSK.

Для минимизации энергопотребления используется алгоритм Adaptive Data Rate:

1. При нормальном режиме данные передаются каждые 10 мин.
2. При аварии (отклонение температуры) интервал сокращается до 30 с.

Локальное хранение данных. Преимущества решения:

- Отказоустойчивость: данные доступны даже при отключении интернета.
- Безопасность: исключен риск утечек через внешние сервисы.
- Скорость доступа: чтение/запись занимает ≤ 2 с (тест Random Read/Write).

Для анализа данных реализован скрипт на Python 3.9, генерирующий отчеты в формате PDF. Пример экспорта отчета за сутки:



```
import pandas as pd
data = pd.read_csv("storage/log_2024-05-30.csv")
print(data.describe())
```

Интеграция Telegram-бота. Бот развернут на локальном Raspberry Pi 4 (ОС: Raspbian) с использованием библиотеки python-telegram-bot. При критических отклонениях температуры:

1. Микроконтроллер отправляет HTTP-запрос на внутренний сервер (IP: 192.168.0.10).

2. Сервер генерирует уведомление и сохраняет лог в файл alerts.log.

Команды бота:

- /get_log – выгрузка данных за указанную дату;
- /last_alert – последнее аварийное событие.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 56938–2016. Надежность систем промышленного мониторинга.
2. Patel M.K. Edge Computing for IoT. – Springer, 2021. – 189 с.
3. Raspberry Pi Documentation [Электронный ресурс]. – URL: raspberrypi.com/documentation (дата обращения: 10.10.2023).
4. Иванов А.В. Локальные системы хранения данных в промышленности. – М.: Техносфера, 2022. – 154 с.

ПОДСЕКЦИЯ 1.6

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

*Председатель секции – Шурыгин Ю.А., советник
при ректорате по комплексным вопросам
функционирования университета, д.т.н., проф.;*
зам. председателя – Черкашин М.В., доцент каф. КСУП, к.т.н.

УДК 004.416.6

МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА ПОИСКА ПОРЯДКА ВКЛЮЧЕНИЯ СЕКЦИЙ МНОГОРАЗРЯДНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ

*К.Н. Полушвайко, А.А. Зуевич, А.С. Кученко,
К.А. Ларионов, студенты каф. КСУП*

Научные руководители: А.Е. Горяинов, доцент каф. КСУП, к.т.н.;
А.А. Калентьев, доцент каф. КСУП, к.т.н.

*Проект ГПО КСУП-2203. Разработка ПО в области радиоэлектроники
г. Томск, ТУСУР, pol.konnik@gmail.com*

Рассмотрены проблемы учёта составных разрядов при поиске оптимального порядка включения секций в многоразрядных СВЧ-устройствах. Предлагается модификация алгоритма по формированию возможных комбинаций включения секций. Модифицированный алгоритм позволяет учесть как наличие секций с нефиксированной позицией, так и объединённых в единый разряд.

Ключевые слова: многоразрядные СВЧ-устройства, комбинаторика.

В современной СВЧ-электронике широко применяются много-разрядные переключаемые устройства, такие как ступенчатые аттенюаторы и фазовращатели. Для ускорения их разработки компания 50ohm Technologies разработала приложение «Combinatorics», предназначенное для автоматизированного расчёта и анализа различных комбинаций включения секций [1].

Секция – это физический фрагмент схемы, который может обеспечивать заданное ослабление или сдвиг фазы. Программа позволяет использовать несколько вариантов схем в качестве одной секции. Программа выполнит перебор комбинаций включения секций в том числе с разными вариантами самих секций. Каждый вариант пред-

ставлен парой файлов формата Touchstone для опорного состояния и состояния ослабления/сдвига фазы [2].

Разряды (или биты управляющего сигнала) включают / выключают соответствующие секции, формируя нужные уровни ослабления или сдвига фазы. При этом в ряде случаев возникает необходимость группировки нескольких секций одним разрядом, когда, например, сложно или нецелесообразно реализовать требуемое ослабление/сдвиг фазы в рамках одной секции.

В исходной версии алгоритма приложения «Combinatorics» предполагалось, что секции многоразрядного СВЧ-устройства могут свободно менять свою позицию или иметь заранее определённые позиции. Для учёта различных схмотехнических вариантов использовалась формула подсчёта общего количества возможных комбинаций

$$K = U! * \prod_{k=1}^c S_k ,$$

где U – количество секций с нефиксированной позицией; c – общее число секций; S_k – количество схмотехнических вариантов для k -й секции.

Однако пользователи программы столкнулись с дополнительными требованиями. В реальных СВЧ-устройствах может возникнуть ситуация, когда один разряд состоит из несколько секций, причём эти секции в итоговой топологии устройства должны быть расположены физически рядом.

Такая группа секций должна рассматриваться как единый неразрывный блок при перестановке, но внутри этого блока возможна собственная перестановка секций. Это требование меняет расчётную формулу количества комбинаций, так как вместо независимого набора секций появляется совокупность «блоков» и отдельных секций.

Таким образом, для дальнейшего развития алгоритма потребовалась его модификация, учитывающая составные разряды и потенциально фиксированные позиции отдельных секций. Новые условия потребовали пересмотреть исходную формулу и дополнить её факторами, отражающими наличие групп секций. В частности, если существует r составных разрядов, каждый из которых охватывает группу секций размером G_j , и сохраняется возможность выбирать схмотехнические варианты S_k для каждой секции, итоговое число комбинаций без учёта фиксированных секций может выражаться в следующем виде:

$$K = (U + r)! * \prod_{j=1}^r G_j! * \prod_{k=1}^c S_k ,$$

где $(U + r)!$ – число способов расставить по порядку U нефиксированных секций и r групп секций; второй множитель – число способов переставить секции внутри каждого составного разряда; третий множитель – произведение числа схемных вариантов по всем секциям.

Дополнительно если часть секций имеет жёстко зафиксированное расположение, необходимо исключать варианты перестановок, в которых эти секции занимают чужие позиции либо позиции, недопустимые для групп. В общем случае это требует более сложного алгоритма перебора и проверки всех конфигураций на соответствие топологическим ограничениям. Однако базовая идея – учёт составных разрядов – уже заложена в предлагаемой модифицированной формуле.

Ведется разработка предложенного алгоритма расстановки секций с учётом составных разрядов и частично фиксированных позиций. Реализация алгоритма позволит пользователям выполнять более тонкую настройку требований при определении порядка включения секций внутри переключательного устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калентьев А.А. Синтез СВЧ-интегральных ступенчатых аттенуаторов и фазовращателей в интеллектуальной САПР «Смекалец» // Российский форум «Микроэлектроника 2024»: 10-я науч. конф. «ЭКБ и микроэлектронные модули». – Федеральная территория «Сириус», 23–28 сентября 2024.

2. Touchstone Version 2.0 [Электронный ресурс]: сайт IBIS Open Forum. – URL: http://www.ibis.org/touchstone_ver2.0/touchstone_ver2_0.pdf (дата обращения: 06.03.2025).

УДК 004.418

ВНЕДРЕНИЕ МОДУЛЯ ОТРИСОВКИ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ ДЛЯ САПР СВЧ-УСТРОЙСТВ

В.Е. Борнашов, И.А. Данилов, Н.Е. Исайченко, студенты;

А.Е. Горяинов, доцент каф. КСУП

г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, shipverty@vk.com

Описан процесс внедрения нового модуля отрисовки принципиальных схем СВЧ-устройств в САПР «Circuit Studio» компании 50ohm Technologies. Определены модули, с которыми модуль отрисовки будет связан в основной программе.

Ключевые слова: САПР СВЧ-устройств, внедрение ПО, проектирование ПО, отрисовка схем.

На данный момент активно развивается использование устройств, изготовленных на основе монолитной технологии изготовления (мо-

нолитные интегральные схемы или МИС), так как такие устройства являются универсальными и могут применяться в разных сферах: интернет вещей, беспилотные автомобили, беспроводные системы связи.

Для разработки СВЧ-устройств в настоящее время активно разрабатываются так называемые интеллектуальные САПР. В отличие от классических САПР, направленных в первую очередь на решение задачи моделирования, интеллектуальные САПР способны решать задачу проектирования, т.е. поиска схемных решений с использованием подходов искусственного интеллекта с минимальным участием человека [1]. Разработка такой САПР ведется в компании «50ohm Technologies», где синтез устройств выполняется при помощи генетических алгоритмов.

Особенностью программы является то, что синтез выполняется с использованием логического представления схемы в виде дерева, а не элементов, расположенных в пространстве. Для того чтобы пользователь мог продолжить работу с полученным схемным решением, необходимо преобразовать логическое представление в принципиальную схему и выполнить её отрисовку на пользовательском интерфейсе.

В предыдущих работах [2, 3] описана работа по рефакторингу модуля отрисовки с целью разделения его на два независимых модуля – расстановки и отрисовки. Целью данной работы является описание внедрения разработанного модуля отрисовки в САПР СВЧ-устройств «Circuit Studio».

В сборке «Circuit Studio» существуют классы вкладок, где должен быть размещен новый модуль отрисовки:

- Runner – вкладка запуска синтеза (рис. 1);
- Saved Schematics – вкладка с сохраненными схемами (рис. 2).

На рис. 3 представлена диаграмма пакетов, показывающая связь разработанных модулей с существующей САПР.

1. Модуль Circuit – связывает работу модуля расстановки и модуля отрисовки, храня представление принципиальной схемы и её элементов.

2. Модуль Circuit.Editing – содержит бизнес-логику по отрисовке содержимого полотна, а также логику по обработке пользовательского ввода.

3. Circuit Studio – содержит классы вкладок, где должен быть размещен модуль.

Таким образом, проведено проектирование внедрения модифицированных модулей в САПР «Circuit Studio». Определены вкладки программы, где будет находиться новый модуль. После реализации предложенной архитектуры будет выполнено системное тестирование приложения.

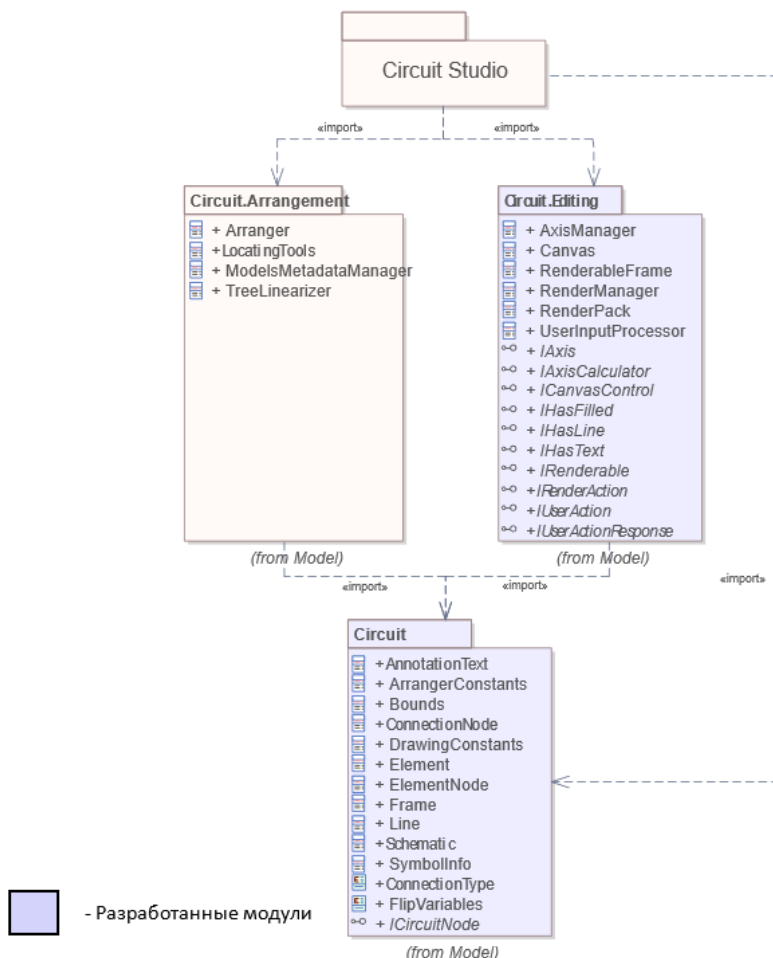


Рис. 3. Диаграмма пакетов новой архитектуры

ЛИТЕРАТУРА

1. Курейчик В.М. Введение в интеллектуальные системы автоматизированного проектирования / В.М. Курейчик, В.Б. Тарасов // Изв. Южного фед. ун-та. Технические науки. – 1997. – С. 41–49.
2. Данилов И.А. Рефакторинг модуля автоматического размещения элементов принципиальной схемы в САПР СВЧ-устройств / И.А. Данилов, В.Е. Борнашов, Н.Е. Исайченко // Матер. докладов XIII регион. науч.-практ. конф.: «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения – 2024». – Томск: ТУСУР, 2024. – С. 325–327.

3. Борнашов В.Е. Проектирование модуля отрисовки принципиальных схем в САПР СВЧ-устройств / В.Е. Борнашов, И.А. Данилов, Н.Е. Исайченко // Матер. докладов XIII регион. науч.-практ. конф.: «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения – 2024». – Томск: ТУСУР, 2024. – С. 288–291.

УДК 004.418

ЗАДАЧА АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАССТАНОВКИ УГО-ЭЛЕМЕНТОВ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ САПР

И.А. Данилов, Н.Е. Исайченко, В.Е. Борнашов, студенты;

А.Е. Горяинов, доцент каф. КСУП

г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, llykha1@mail.ru

Описаны существующие модули САПР «Circuit Studio», с которыми будет взаимодействовать модуль автоматической расстановки элементов принципиальных схем после его внедрения в основную программу.

Ключевые слова: САПР СВЧ-устройств, внедрение ПО, расстановка элементов схемы.

В компании 50ohm Technologies ведется разработка системы автоматизированного проектирования (САПР) СВЧ-устройств. Программный комплекс способен в автоматическом режиме по заданным требованиям синтезировать следующие устройства:

1. **Маломощный усилитель (МШУ)** – это устройство, которое усиливает слабый электрический сигнал, при этом добавляя к нему минимальный уровень шума.

2. **Фазовращатель** – устройство, предназначенное для изменения фазы высокочастотного или сверхвысокочастотного сигнала без значительного влияния на его амплитуду.

3. **Аттенуатор** – четырехполюсник, обеспечивающий плавное или дискретное изменение вносимого ослабления от минимального значения до максимального значения.

4. **Коммутатор** – многополюсник, имеющий один или несколько входов и ряд выходов. Сигналы, поданные на входы, поступают по одному или нескольким изменяемым при переключении каналам на выходы с минимальными потерями и при выполнении условий согласования.

По итогу работы синтеза получают готовые решения в виде логических представлений схем [1] (рис. 1).

```

Connection: Cascade
Element: MLIN M1      (W = 40, L = 150)
Element: MIMCAP1 M2   (W = 100, L = 100)
Element: TFR1 R3      (W = 60, L = 80)
Connection: Shunt
Element: MLIN M4      (W = 30, L = 60)
Element: MIMCAP1 M5   (W = 100, L = 100)
Element: BACKVIA1P B6
Connection: Parallel
Element: MLIN M7      (W = 100, L = 200)
Element: MLIN M8      (W = 100, L = 200)
Element: TFR1 R9      (W = 60, L = 80)

```

Рис. 1. Логическое представление схемы

После получения логического представления необходимо преобразовать его в описание принципиальной схемы устройства для дальнейшей отрисовки (рис. 2). Существующий модуль расстановки и отрисовки имеет недостатки, связанные с высокой связностью и низкой масштабируемостью.

```

Elements:
MLIN      (X = 200, Y = 0, RotationAngle = 0, Flip = None)
MIMCAP1   (X = 1400, Y = 0, RotationAngle = 0, Flip = None)
TFR1      (X = 2600, Y = 0, RotationAngle = 0, Flip = None)
MLIN      (X = 4000, Y = 200, RotationAngle = 270, Flip = None)
MIMCAP1   (X = 4000, Y = 1400, RotationAngle = 270, Flip = None)
BACKVIA1P (X = 4000, Y = 2600, RotationAngle = 0, Flip = None)
MLIN      (X = 4600, Y = -400, RotationAngle = 0, Flip = None)
MLIN      (X = 4600, Y = 0, RotationAngle = 0, Flip = None)
TFR1      (X = 4600, Y = 400, RotationAngle = 0, Flip = None)
PORT      (X = 0, Y = 0, RotationAngle = 0, Flip = None)
PORT      (X = 5800, Y = 0, RotationAngle = 0, Flip = FlipY)

Lines:
Line ({4000, 0} {4000, 200})
Line ({4000, 1200} {4000, 1400})
Line ({4000, 2400} {4000, 2600})
Line ({3800, 0} {4200, 0})
Line ({4400, 0} {4600, 0})
Line ({4600, -400} {4600, 400})
Line ({5600, -400} {5600, 400})
Line ({5600, 0} {5800, 0})
Line ({0, 0} {200, 0})
Line ({1200, 0} {1400, 0})
Line ({2400, 0} {2600, 0})
Line ({3600, 0} {3800, 0})
Line ({4200, 0} {4400, 0})

```

Рис. 2. Пространственное описание принципиальной схемы устройства

Рефакторинг модуля заключается в разделении модулей отрисовки и расстановки на 2 отдельных, что позволит устранить данные недостатки.

После проведения рефакторинга необходимо внедрить решения в основную программу. Таким образом, **целью данной работы** является

ся внедрение разработанного модуля расстановки в САПР «Circuit Studio».

Модули, взаимодействующие с модулем отрисовки. В пакете Circuit Studio имеются классы вкладок Runner и Saved Schematics, в которых происходит взаимодействие с модулями расстановки и отрисовки.

Для работы с данными модулями необходима сборка Circuit, содержащая классы ConnectionNode и ElementNode для логического представления схемы, а также Element, Line, Schematic, которые описывают пространственное представление схемы.

Для того чтобы расставить элементы схемы, пакет Circuit.Arrangement импортирует метаданные элементов Process design kit (PDK), взятые из загружаемого двойника PDK (PDK Twin), которые хранятся в библиотеке FiftyOhm.Circuit.Common [2].

Для сохранения общих сведений о работе модуля расстановки, необходимые для отладки, пакет Circuit.Arrangement импортирует сборку FiftyOhm.SDK.Logger для использования логирования.

Таким образом, были определены пакеты, с которыми будет взаимодействовать модуль автоматической расстановки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов И.А. Рефакторинг модуля автоматического размещения элементов принципиальной схемы в САПР СВЧ-устройств / И.А. Данилов, В.Е. Борнашов, Н.Е. Исайченко // Матер. докладов XIII регион. науч.-практ. конф.: «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения – 2024». – Томск: ТУСУР, 2024. – С. 325–327.

2. Экспериментальное исследование подходов синтеза СВЧ-устройств с использованием библиотек моделей элементов / Ю.А. Новичкова, Д.В. Билевич, А.Е. Горяинов, А.А. Калентьев // Электронные средства и системы управления: матер. докл. XVII Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2021. – Ч. 1. – С. 29–32.

УДК 004.418

МОДИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ ЭКСПОРТА МОДЕЛЕЙ СВЧ-КОМПОНЕНТОВ PDK BRIDGE

В.Д. Боровкова, К.А. Ларионов, А.С. Кученко, студенты;

А.Е. Горяинов, доцент каф. КСУП

г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, v.boro0ovko0ova@gmail.com

Рассматривается процесс переноса программы PDK Bridge с Windows Presentation Foundation (WPF) на Avalonia UI с целью обеспечения кроссплатформенности и устранения ограничений, связанных с использованием WPF. Описаны этапы миграции, включая перенос графических стилей, адаптацию логики пользова-

тельского интерфейса и переработку классов, относящихся к слою View в архитектуре MVVM.

Ключевые слова: САПР, .NET, WPF, Avalonia UI.

В работах [1, 2] описывалась программа PDK Bridge, которая предназначена для получения данных о математических моделях СВЧ-устройств из PDK сторонних САПР. В дальнейшем полученные данные используются в программе 50ohm Technologies Circuit Studio», благодаря чему возможен учет особенностей целевой технологии изготовления во время синтеза схемных решений СВЧ-устройств. Первая версия PDK Bridge была разработана на основе прототипа для проверки концепции и обладала рядом недостатков, присущих прототипам, в частности, непродуманная архитектура пользовательского интерфейса, отсутствие графических стилей, соответствующих программному комплексу, в который входит PDK Bridge. В данной статье описывается разработка обновления для программы PDK Bridge, устраняющей перечисленные недостатки.

Программа PDK Bridge разработана на базе Windows Presentation Foundation (WPF) – графической подсистемы Microsoft для разработки пользовательских интерфейсов [3]. Технология обеспечивает широкую функциональность, но ограничена зависимостью от Windows API и отсутствием нативной кроссплатформенности. Прекращение активного развития WPF по сравнению с современными фреймворками может ограничивать долгосрочную перспективность ее использования.

Целью данной статьи является описание переноса программы на Avalonia UI – кроссплатформенный фреймворк для разработки пользовательских интерфейсов на .NET, позволяющий устранить перечисленные выше ограничения WPF [4].

Исходя из цели сформулированы следующие задачи:

- 1) осуществить перенос графических стилей, обеспечив их соответствие программному комплексу, частью которого является PDK Bridge;
- 2) изучить документацию Avalonia UI, выделить ключевые отличия с WPF;
- 3) переписать стили элементов с WPF на Avalonia;
- 4) адаптировать реализацию логики работы клиентской части под Avalonia.

Макет новой версии программы PDK Bridge представлен на рис. 1.

Переход на Avalonia требует адаптации существующих классов, отвечающих за пользовательский интерфейс. Программа PDK Bridge реализует архитектуру MVVM (Model-View-ViewModel), поэтому при переносе с WPF на Avalonia необходимо адаптировать классы, относящиеся к слою View (рис. 2). В частности, требуется переработка следующих компонентов: Converters, Controls и View.

PDK Elements

SWT Schematics

CS Schematics

EDA Elements

PDK Foundry

Name of Element:

Number of Ports:

Elements:

BACKVIA1P

MIMCAP1

MLEFX

PAD

Rost_EM_rectangular

TFR1

TFR2

Add >>

<< Remove

PDK Twin

Elements:

MIMCAP3

MIMIMCAP

MLIN

PADGSGVIA

Element Parameters:

State	Value	Var	Lower	Upper	Step	
W	20	um	☒	10	20	5
L	100	um	☒	10	1000	5
MSUB	pHEMT025D		☐	0	0	0

Settings

Key File:

Save

To sNp

Load

Number of states (selected element/all elements): 597/712

Рис. 1. Макет приложения PDK Bridge

```

classDiagram
    package Converters {
        +BooleanAllConverter
        +DictionaryToBindingConverter
        +InverseBooleanConverter
    }
    package Helpers {
        +ElementsStatesCountHelper
        +NumberValidationHelper
        +TaskHelper
        +TextBoxEventHandlerHelper
    }
    package Validators {
        +ChooseEdaToConnectValidator
        +CircuitElementParameterValidator
        +CircuitElementValidator
        +ElementParameterValidator
        +ElementParameterVMValidatorsFactory
        +FrequencyValidator
        +SchematicValidator
        +SymbolPortInfoValidator
        +ValidatorBase
    }
    package Controls {
        +CircuitElementsControl
        +DCVoltageSourceParameters
        +DataGridControl
        +ElementParametersDataGridControl
        +ElementsSearchControl
        +StatusBarControl
        +SymbolPortsInfoControl
    }
    package PDKBridge.View {
        +App
        +MainWindow
        +SplashScreenWindow
    }
    package Views {
        +CustomMessageBox
        +ProjectElementsPanel
        +SettingsWindow
    }
    package Views.ElementsViews {
        +ElementsView
        +PdkTwinElementsPanel
    }
    package Views.EdaChoiceViews {
        +ChooseEdaToConnectWindow
    }
    package Views.CSSSchematicsViews {
        +CSSSchematicsView
        +PdkTwinCSSSchematicsPanel
    }
    package Views.SwtSchematicsViews {
        +PdkTwinSwtSchematicsPanel
        +SwtSchematicsView
    }

    PDKBridge.View --> Converters : import
    PDKBridge.View --> Helpers : import
    PDKBridge.View --> Validators : import
    PDKBridge.View --> Controls : import
    PDKBridge.View --> Views : import
    Views --> Views.ElementsViews : import
    Views --> Views.EdaChoiceViews : import
    Views --> Views.CSSSchematicsViews : import
    Views --> Views.SwtSchematicsViews : import
    
```

Рис. 2. UML-диаграмма пользовательского интерфейса

140

На текущем этапе разработки завершен перенос стилей из CircuitStudio, а также осуществляется миграция стилей с WPF на Avalonia. На следующем этапе планируется адаптация логики пользовательского интерфейса к новому фреймворку, после чего будут проведено тестирование и отладка приложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальное исследование подходов синтеза СВЧ-устройств с использованием библиотек моделей элементов / Ю.А. Новичкова, Д.В. Билевич, А.Е. Горяинов, А.А. Калентьев // Матер. XVII Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления»: в 2 ч. – Томск, В-Спектр, 2021. – Ч. 1. – С. 29–33
2. Боровкова В.Д. Модификация программы экспорта табличных моделей элементов PDK Bridge для взаимодействия со сторонней САПР / В.Д. Боровкова, К.А. Ларионов, А.А. Зуевич // Матер. регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения». – Томск, ТУСУР, 2024. – С. 255–258.
3. Официальная документация WPF [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/desktop/wpf/?view=netdesktop-9.0>, свободный (дата обращения: 03.03.2025).
4. Официальная документация Avalonia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.avaloniaui.net/ru/docs/welcome>, свободный (дата обращения: 03.03.2025).

УДК 004.415

РЕАЛИЗАЦИЯ ЭКСПОРТА ТОПОЛОГИЙ СВЧ-КОМПОНЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ API САПР СВЧ-УСТРОЙСТВ

*К.А. Ларионов, В.Д. Боровкова, К.Н. Полушвайко, студенты;
А.Е. Горяинов, доцент каф. КСУП
г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, lari-kir2013@mail.ru*

Рассматривается решение проблемы закрытого доступа к топологическим данным СВЧ-компонентов. Предлагается использовать API САПР для экспорта топологий из библиотек PDK и создания их дубликатов. Модуль «50ohm Tech PDK Bridge» позволяет автоматически собирать необходимую информацию о компонентах, чтобы в дальнейшем использовать в автоматизированном синтезе топологий СВЧ-устройств.

Ключевые слова: САПР СВЧ-устройств, разработка топологий СВЧ-устройств, взаимодействие с API САПР.

Разработка СВЧ-монокристаллических интегральных схем (МИС) – сложный, долгий и многоэтапный процесс. Для улучшения процесса раз-

работки СВЧ МИС этапы проектирования стараются автоматизировать. В настоящее время ведется разработка программы синтеза топологий СВЧ-устройств на основе готового схемного решения. Предполагается, что пользователь в качестве входных данных загружает схемное решение устройства, а также топологии отдельных элементов, после чего программа выполняет синтез топологии конечного устройства по ряду критериев. Полученное решение можно экспортировать в традиционную САПР.

Проблема заключается в том, что информация о топологии производимых компонентов СВЧ-устройств является закрытой и поставляется только внутри библиотек элементов (Process Design Kit – PDK) [1], которые доступны только в САПР, для которой этот PDK разработан.

В [2] был описан подход, позволяющий получать табличные модели элементов из PDK через API (Application Programming Interface) [3] САПР. Данный подход также применим для получения информации о топологиях элементов для программы синтеза топологий СВЧ МИС.

Таким образом, целью данной работы является описание экспорта топологий СВЧ-компонентов с использованием API САПР, позволяющего решить проблему с доступом информации о топологии.

Топология компонента представляет собой следующую информацию, полученную через API САПР:

1. Геометрические фигуры, составляющие элемент.
2. Граница топологии – прямоугольник минимальной площади, который полностью охватывает топологию фигуры.
3. Порт – протяженная область (обычно нулевой толщины):
 - номер порта;
 - центральная точка порта;
 - направление порта;
 - ширина порта.
4. Точка отсчета топологической ячейки в САПР.
5. Ассоциативная связь топологии с электрическим элементом в схеме.

Для создания дубликата PDK на основе библиотеки элементов, представленных в САПР, с целью последующего использования первой в программах синтеза используется модуль «50ohm Tech PDK Bridge» [1].

Последовательность действий пользователя для создания дубликата библиотеки:

1. Подключение к проекту с PDK, используя API САПР.

2. Поиск компонентов по названию или количеству портов.
3. Выбор необходимых компонентов, использующихся в синтезе схемного решения.
4. Настройка параметров состояния элементов, которые будут использоваться в синтезе.
5. Сохранение дубликата библиотеки PDK.

Таким образом, данный подход позволяет произвести экспорт топологии СВЧ-компонентов в дубликат библиотеки компонентов, который позволит использовать данную информацию в программе синтеза топологии схемных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальное исследование подходов синтеза СВЧ-устройств с использованием библиотек моделей элементов / Ю.А. Новичкова, Д.В. Билевич, А.Е. Горяинов, А.А. Калентьев // Электронные средства и системы управления: матер. докл. XVII Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2021. – Ч. 1. – С. 29–32.
2. Получение коммутационного транзистора с использованием библиотек моделей элементов для синтеза СВЧ-устройств / Ю.А. Новичкова, А.А. Метель, А.А. Щедрин, Н.А. Набережнев, В.С. Швоев // Сборник статей по матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2022». – Томск: В-Спектр, 2022. – Ч. 1. – С. 146–148.
3. Лоре А. Проектирование веб-API – М.: ДМК-Пресс, 2020. – 440 с.

УДК 004.418

МОДИФИКАЦИЯ МОДУЛЯ ЭКСПОРТА ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ ДЛЯ САПР СВЧ-УСТРОЙСТВ

Н.Е. Исайченко, В.Е. Борнашов, И.А. Данилов, студенты;

А.Е. Горяинов, доцент каф. КСУП

г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, nik_isaichenko@vk.com

Модифицирован модуль экспорта с учетом новой архитектуры, позволяющей избавиться от высокой связности с модулем расстановки, а также добавлена новая функциональность, расширяющая возможности модуля экспорта.

Ключевые слова: САПР СВЧ-устройств, модификация модуля экспорта, взаимодействие с API САПР.

В компании «50ohm Technologies» ведется разработка системы автоматизированного проектирования СВЧ-устройств «Circuit Studio» [1–3]. Программный комплекс выполняет автоматизированный синтез схемных решений СВЧ-устройств по комплексу требований к частотным характеристикам на основе генетического алгоритма.

Особенностью программы является то, что программа выполняет синтез на основе логического представления цепи, а не элементов, расставленных и соединенных по координатам. Для отрисовки принципиальной схемы или экспорта в целевую САПР (AWR Design Environment) для доработки или разработки топологии логическое представление необходимо преобразовать в пространственное расположение элементов, связанных друг с другом соединительными линиями.

В текущей реализации модуль экспорта содержит в себе логику преобразования логического представления, что увеличивает сложность модуля и его связность. Ранее в работе [4] предложено решение по разделению логики экспорта и расстановки для уменьшения связности. В данной работе описана реализация предложенного решения.

Целью данной работы является модификация модуля экспорта принципиальных схем для САПР СВЧ-устройств с учетом новой архитектуры. Для выполнения этой цели необходимо:

1) отделить существующую функциональность от других модулей, убрав все зависимости между ними;

2) добавить новую функциональность в соответствии с требованиями к модулю экспорта:

- экспорт рамок и текста на схемы проекта AWR DE;
- экспорт Equations в проект AWR DE;
- формирование целевой функции (Goals) внутри проекта AWR DE для выполнения параметрической оптимизации;
- экспорт разных типов графиков (прямоугольный, прямоугольный с комплексными значениями, полярный, диаграмма Вольперта–Смита, табличный, график работы антенны, гистограмма, график созвездия);
- экспорт графиков с двумя вертикальными осями.

Реализованная функциональность. На рис. 1 представлена диаграмма классов модифицированного модуля экспорта.

1. Circuit.Export – пакет, в котором находятся классы, вызываемые в клиентском коде для экспорта определенных частей схемы. Класс ExportManager предоставляет методы, принимающие в качестве аргументов информацию, полученную от модуля расстановки, которая потом передается в конкретный класс экспортер. Например, класс SchematicExporter получает списки элементов, соединительных линий, портов и экспортирует их в САПР.

2. EDA.Common – ключевой пакет, предоставляющий базовые интерфейсы, которые отвечают за подключение к САПР, создание схем, графиков и остальных элементов, а также за описание сущностей из САПР для работы с ними в коде.

3. EDA.AWRDE.v** – пакеты, реализующие интерфейсы из пакета EDA.Common. Предоставляют API для работы с разными версиями САПР.

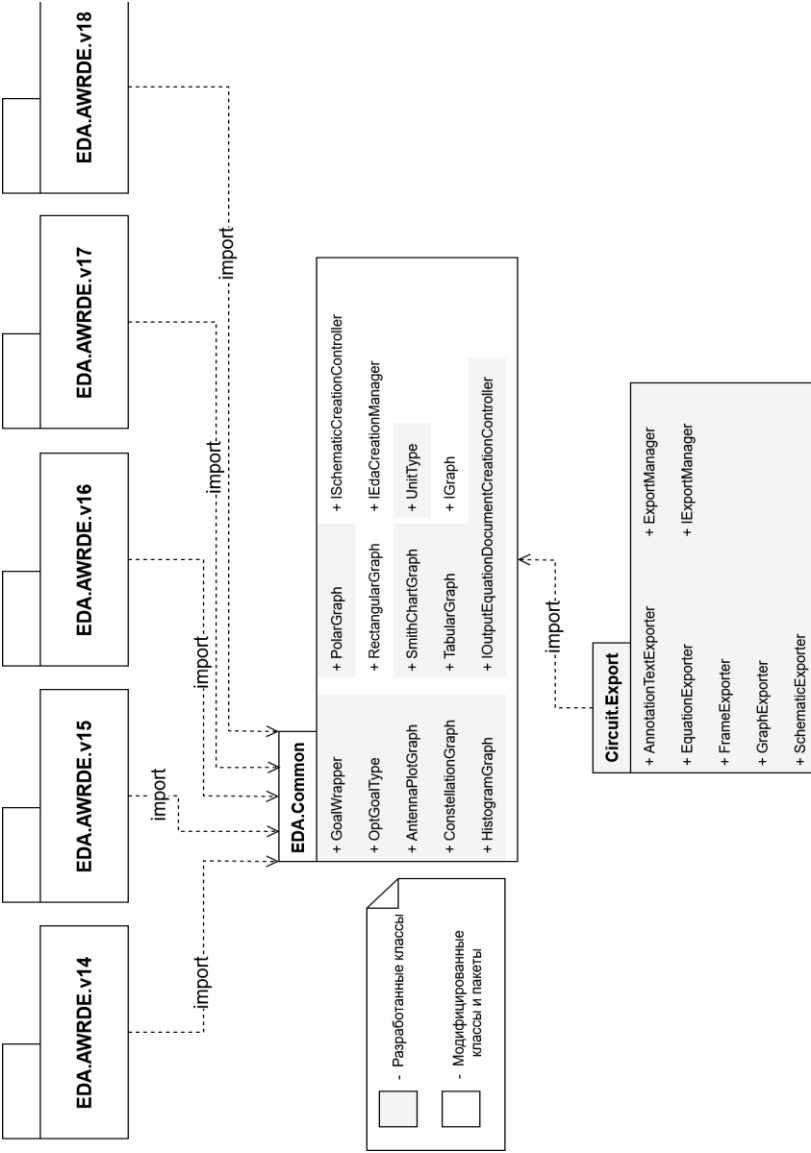


Рис. 1. Диаграмма классов модифицированного модуля экспорта

Таким образом, логика модуля расстановки была вынесена из модуля экспорта. Теперь модуль экспорта через класс ExportManager получает объекты, классы которых реализуют интерфейсы из пакета EDA.Common, что позволяет избавиться от зависимости с модулем расстановки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Визуализация схемного решения в приложении синтеза малошумящего усилителя / Е.В. Кабанова, Н.А. Набережнев, В.С. Швоев, А.А. Калентьев // Сб. избр. статей научной сессии ТУСУР: матер. докладов междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2023», Томск, 17–19 мая 2023 г. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2023. – Ч. 2. – С. 255–260.

2. Реализация моделирования многокаскадного малошумящего усилителя / Е.В. Кабанова, Н.А. Набережнев, В.С. Швоев, А.А. Калентьев // Сб. избр. статей научной сессии ТУСУР: матер. докладов междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2023», Томск, 17–19 мая 2023 г. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2023. – Ч. 2. – С. 264–267.

3. Разработка модуля быстродействующего моделирования характеристик СВЧ ИС МШУ / В.С. Швоев, Н.А. Набережнев, Е.В. Кабанова, А.Е. Горяинов // Матер. докл. XIX Междунар. науч.-техн. конф. «Электронные средства и системы управления», Томск, 15–17 ноября 2023 г. – Томск: ТУСУР, В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), 2023. – Ч. 1. – С. 48–51.

4. Исайченко Н.Е. Проектирование рефакторинга модуля экспорта принципиальных схем в САПР СВЧ-устройств / Н.Е. Исайченко, В.Е. Борнашов, И.А. Данилов // Матер. докл. регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения – 2024», Томск, 21 октября – 27 декабря 2024 г. – Томск: ТУСУР, 2025. – С. 420–422.

УДК 004.416.6

РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ПРОГРАММЫ ДЕЭМБЕДДИНГА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ СВЧ-КОМПОНЕНТОВ

А.А. Зуевич, К.Н. Полушвайко, Т.Р. Рафиков,

В.Д. Боровкова, студенты каф. КСУП

Научные руководители: А.Е. Горяинов, доцент каф. КСУП, к.т.н.;

А.А. Калентьев, доцент каф. КСУП, к.т.н.

*Проект ГПО КСУП-220. Разработка ПО в области радиоэлектроники
г. Томск, ТУСУР, ksandr1a.tyz@yandex.ru*

Приводятся результаты работы над расширением функциональности модифицированного ранее приложения Deembedding Desktop:

добавление новых методик деэмбеддинга, новых особенностей пользовательского интерфейса и приложения в целом.

Ключевые слова: СВЧ, деэмбеддинг, L-2L, Multiline TRL.

Ранее была разработана первая версия модифицированного приложения Deembedding Desktop, позволяющая пользователю осуществлять деэмбеддинг результатов измерений СВЧ-компонентов с использованием методик Open, Open-Short, Open-Short-Thru и Open-Short-Pad [1]. В этой статье описывается дальнейшая разработка приложения Deembedding Desktop: добавление методик деэмбеддинга L-2L и Multiline TRL, реализация индикатора выполнения процесса деэмбеддинга, добавление возможности сохранения настроек пользователя и логгирования.

Для отображения пользователю хода выполнения процесса деэмбеддинга в пользовательском интерфейсе был реализован индикатор выполнения (Progress Bar [2]), показывающий обрабатываемый в данный момент файл измерений и процент выполнения деэмбеддинга всех загруженных пользователем файлов измерений (рис. 1). Также при успешном завершении процесса деэмбеддинга в пользовательском интерфейсе отображается окно с соответствующим сообщением.

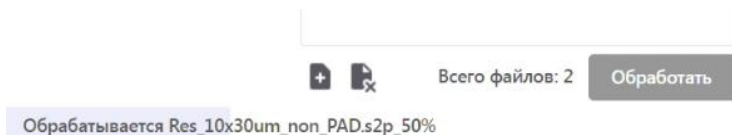


Рис. 1. Пример индикатора выполнения деэмбеддинга

В программу добавлена возможность использовать методики L-2L [3] и Multiline TRL [4]. Внешний вид панели методики Multiline TRL представлен на рис. 2.

Для реализации логгирования действий пользователя и состояний приложения используются библиотеки FiftyOhm.Logging и log4net [5]; из библиотеки log4net используются классы LogManager, FileAppender, Hierarchy и интерфейс ILoggerRepository. Возможность сохранения настроек пользователя реализуют классы WindowSettings и SettingsManager (рис. 3).

Таким образом, приложение Deembedding Desktop позволяет пользователю осуществлять деэмбеддинг результатов измерений с помощью методик Open, Open-Short, Open-Short-Thru, Open-Short-Pad, L-2L и Multiline TRL. Приложение наглядно отображает пользователю процесс деэмбеддинга и сообщение о его результате, сохраняет настройки пользователя и автоматически фиксирует действия пользователя и состояния системы.

Методика: 2port Multiline TRL (Marks, 1991) ▾

Z0, Ohm: 50

Thru: 01_Thru_0p0mm.s2p ... Length, mm: 0

Reflection: 02_Short.s2p ... Type: Short ▾

Lines Count: 3 ▴ ▾

Line 1: 03_Line_1_1p5mm.s2p ... Length, mm: 1,5

Line 2: 04_Line_2_4p0mm.s2p ... Length, mm: 4

Line 3: 05_Line_3_8p0mm.s2p ... Length, mm: 8

Рис. 2. Вёрстка панели методики Multiline TRL

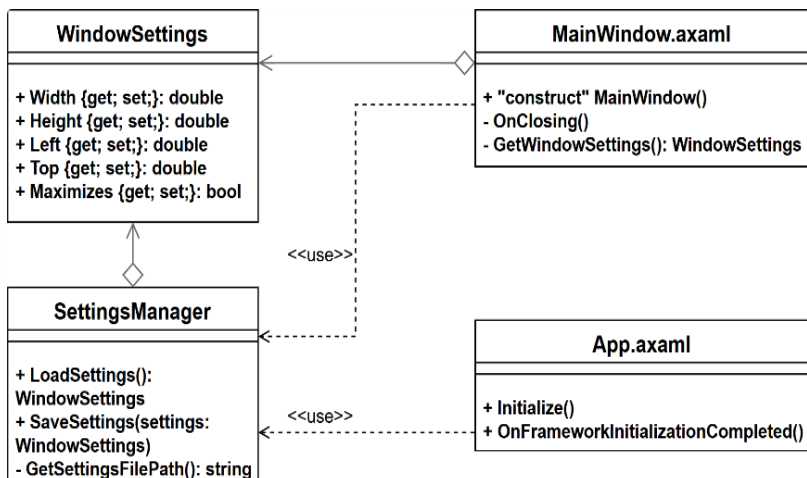


Рис. 3. UML-диаграмма классов, использующих сохранение настроек пользователя и их загрузку

ЛИТЕРАТУРА

1. Зуевич А.А. Модификация программы деэмбеддинга результатов измерений СВЧ-компонентов / А.А. Зуевич, К.Н. Полушвайко, В.Д. Борова // Матер. регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения». – Томск: ТУСУР, 2024. – С. 320–323.

2. Progress Bar | Avalonia Docs [Электронный ресурс]: сайт офиц. документации Avalonia UI. – URL: <https://docs.avaloniaui.net/docs/reference/controls/progressbar> (дата обращения: 26.02.2025).

3. 4 port L-2L de-embedding method [Электронный ресурс]: Google Patents. – URL: <https://patents.google.com/patent/US9530705B2/en> (дата обращения: 26.02.2025).

4. A multiline method of network analyzer calibration [Электронный ресурс]: IEEE Xplore. Advancing Technology for Humanity. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/85388> (дата обращения: 26.02.2025).

5. Log4net Configuration: Effective Logging for .NET Applications [Электронный ресурс]: DataSet Blog. – URL: <https://www.dataset.com/blog/log4net-configuration-effective-logging-for-net-applications/> (дата обращения: 28.02.2025).

УДК 004.424

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ОТДЕЛЬНЫХ ТОПОЛОГИЙ ЛВС

К.Д. Юркина, курсант

*Научный руководитель А.В. Лубенцов, проф. каф. ОПЭ, к.г.н., доцент
г. Воронеж, Воронежский институт ФСИИ России
yurkina_karina_05@mail.ru, lubensov@mail.ru*

Рассматривается создание локальной вычислительной сети с помощью топологии «Звезда». Приведены режимы функционирования, разновидности данной топологии компьютерной сети, а также преимущества и недостатки.

Ключевые слова: топология, звезда, ЛВС, локальная сеть.

Топология – это пространственное расположение компьютерных сетей и метод соединения элементов линиями связи. Она определяет структуру связей между устройствами, возможности расширения сети, а также влияет на оборудование и методы управления обменом.

Существуют два основных типа топологий: физическая и логическая. К основным физическим относятся следующие три базовые топологии сети:

1. Шина (bus).
2. Кольцо (ring).
3. Звезда (star).

Топология «звезда» является наиболее распространенной как для проводных, так и для беспроводных сетей. В ней все устройства подключены кабелем (витой парой) к центральному компьютеру или хабу (hub), который управляет обменом данными. Это создает большую

нагрузку на центральный узел, что может ограничивать его функциональность.

Преимущества топологии «звезда» включают отсутствие конфликтов в работе сети и простоту управления. Однако недостатками являются высокие затраты на кабель, так как все устройства подключены к центральной точке, и уязвимость всей сети при выходе из строя центрального компонента. В случае поломки одного устройства или кабеля остальные устройства продолжают функционировать.

На рис. 1 представлен вид ЛВС с комбинированным режимом работы.

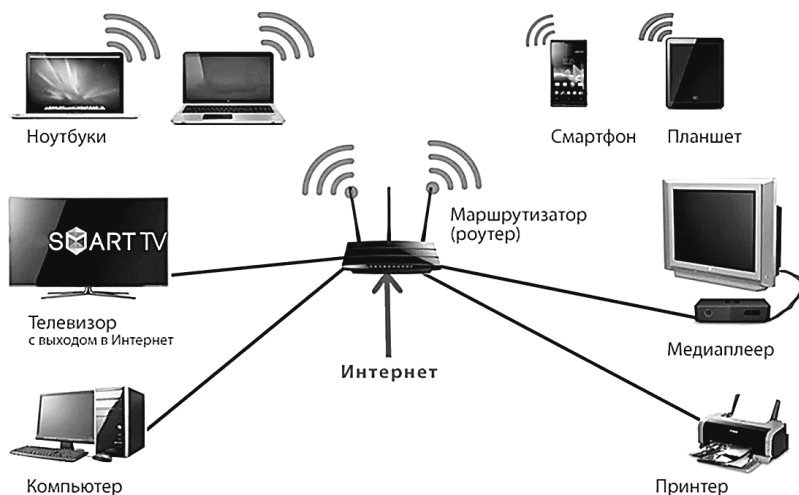


Рис. 1. Подключение оконечных устройств по топологии «звезда»

Анализ моделирования ЛВС. Сеть может работать в полудуплексном или дуплексном режиме в зависимости от поколения коммутатора:

- Беспроводные сети WiFi функционируют только в полудуплексном режиме, подключаясь к узлам поочередно.
- Сети с пассивными или активными концентраторами работают по принципу шины, где коммутатор передает пакеты всем узлам. Клиентские устройства не отражают пакеты, а только отправляют уведомления о получении. Такие сети быстрее шины благодаря лучшему качеству передачи.

- Сети со свитчами обеспечивают высокую скорость и возможность работы в режиме Full Duplex. Свитч создает временные таблицы соответствия портов и адресов, что позволяет направлять пакеты

150

только к конкретным получателям, избегая коллизий и ускоряя передачу данных. Управляемые свитчи могут разделять сеть на изолированные подсети для управления доступом пользователей.

Топология «звезда» подходит для небольших офисных сетей, где достаточно подключить коммутатор и абонентов. Однако провайдеру может быть выгоднее использовать кольцевую топологию для подключения конечных пользователей, так как она обеспечивает защиту от обрывов проводов и отключения питания.

Помимо имеющихся топологий существуют также их гибриды, которые способны минимизировать недостатки основных видов и добавить некоторые преимущества. Далее представлены гибридные топологии для «звезды».

1. *Звезда-шина*. Это комбинация топологий «шина» и «звезда», где несколько сетей «звезда» соединены магистральной линейной шиной. Данный вид создания локальной сети прост в реализации и имеет ряд преимуществ. В этой конфигурации выход из строя одного компьютера не влияет на остальную сеть, но сбой концентратора остановит все подключенные к нему устройства. На главный коммутатор лежит основная нагрузка и от него зависит подключение всех устройств к сети Интернет. Для увеличения надежности данной схемы следует приобрести мощный резервный коммутатор, на который можно будет в случае необходимости заменить главный сетевой коммутатор. Также необходимо иметь заранее сохраненную конфигурацию для того, чтобы уменьшить время замены.

2. *Звезда-кольцо*. Данная топология напоминает «звезду-шину», так как компьютеры подключены к главному сетевому коммутатору, через который осуществляется выход в сеть Интернет. В данной схеме используется намного большее количество кабеля, но и надежность выше. При выходе из строя главного коммутатора, локальная сеть продолжит свое функционирование без доступа в Интернет. Однако можно переподключить оптоволоконный кабель, по которому происходит подключение к Интернету, в другой коммутатор, тем самым можно полностью восстановить работоспособность ЛВС.

Недостатки топологии «звезда» зависят от центрального узла. Она используется в сетях с кабелем «витая пара» UTP 3 и 5 категории и коммутатором в качестве главного устройства. Существуют разные сетевые компоновки, но основными являются три топологии. Важно учитывать их преимущества и недостатки для выбора подходящей.

Выбор топологии зависит от конкретных потребностей сети, бюджета и требований к надежности. Топология «звезда» часто выбирается для небольших и средних офисных сетей благодаря своей простоте и удобству в управлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов А.Н. Архитектура вычислительных систем и компьютерных сетей. – М.: Питер, Русская редакция, 2007.
2. Байер Доминик. Microsoft ASP .NET. Обеспечение безопасности. – М.: Питер, Русская архитектура вычислительных сетей / Э.Я. Якубайтис – Статистика, 1980. Редакция, 2008.

Секция 2

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ПОДСЕКЦИЯ 2.1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИМЕДИЦИНСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ И НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Председатель – Еханин С.Г., проф. каф. КУДР,
д.ф.-м.н., доцент;*

зам. председателя – Славникова М.М., доцент каф. КУДР

УДК 615.471

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ПИКОВ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАММЫ

А.А. Кобызева, ассистент каф. РТС

*Научный руководитель Т.Ф. Щербакова, доцент каф. РТС, к.т.н.
г. Казань, КНИТУ-КАИ, AAKobyzeva@kai.ru*

Предложен алгоритм определения пиков фотоплетизмограммы, проведено тестирование его реализации с использованием сигналов из трёх баз, рассчитана точность определения пиков.

Ключевые слова: фотоплетизмограмма, определение пиков.

Фотоплетизмограмма (ФПГ) является источником информации о состоянии человека. Различные варианты обработки могут использоваться для определения таких параметров, как частота сердечных сокращений, давление. Точное определение пиков фотоплетизмограммы может помочь также в анализе вариабельности сердечного ритма, где важно обозначить не только число сокращений сердца за выделенный промежуток, но и их временное положение.

Для решения задачи обнаружения пиков ФПГ был разработан алгоритм, основанный на алгоритме определения R-зубцов Пана–Томпкинса. Предложенный алгоритм включает в себя четыре основных этапа:

1. Применение полосового фильтра. Используется фильтр Баттерворта 3-го порядка с полосой пропускания 0,5–5 Гц.

2. Стандартизация сигнала. Используется формула (1), где $ppgs(i)$ – стандартизованный i -й отсчёт ФПГ, $ppg(i)$ – i -й отсчёт ФПГ, $\text{mean}(ppg)$ – среднее значение отсчётов ФПГ, $\text{std}(ppg)$ – среднее квадратическое отклонение отсчётов ФПГ [1].

$$ppgs(i) = \frac{ppg(i) - \text{mean}(ppg)}{\text{std}(ppg)}. \quad (1)$$

3. Применение скользящей средней.

4. Определение максимумов согласно алгоритму Пана–Томпкинса [2].

На рис. 1 приведен пример результата обнаружения пиков ФПГ. Можно отметить, что алгоритм корректно работает на сигнале с шумами и дрейфом. Реализация алгоритма выполнена на языке программирования Python.

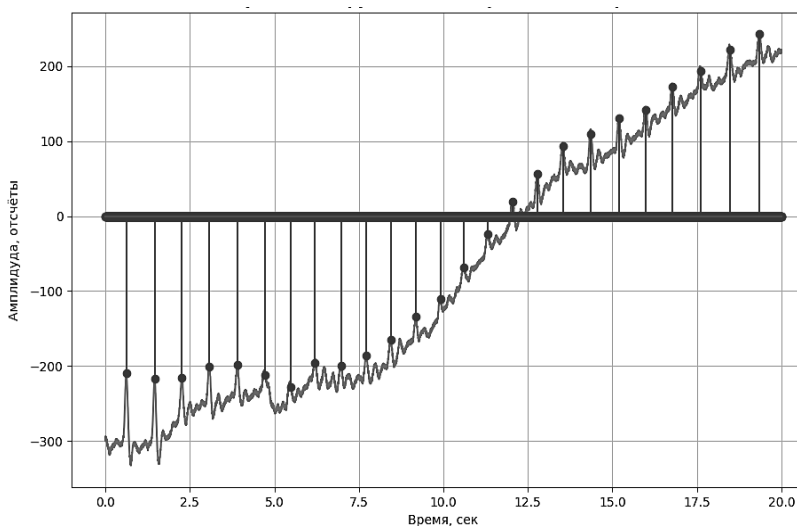


Рис. 1. Результат обнаружения пиков фотоплетизмограммы

Для проверки разработанного алгоритма использовались три базы сигналов:

1. База сигналов КНИТУ-КАИ – частота дискретизации 250 Гц, записи длительностью от 2 до 12 мин, сняты с добровольцев.

2. Video Pulse Signals in Stationary and Motion Conditions – частота дискретизации 1000 Гц, записи длительностью порядка одной минуты, сняты с волонтеров [3].

3. BIDMC PPG and Respiration Dataset – частота дискретизации 125 Гц, записи длительностью порядка 8 мин, сняты с критически больных пациентов медицинского центра Beth Israel Deaconess [4].

Из баз КНИТУ-КАИ и BIDMC взято по 10 сигналов, из базы Video Pulse – 12. Результаты обнаружения пиков в выбранных сигналах сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты работы алгоритма

База сигналов	Обнаружено пиков	Ложные срабатывания	Пропуски
КНИТУ-КАИ	5 814	2	7
BIDMC PPG and Respiration Dataset	6 690	4	0
Video Pulse Signals in Stationary and Motion Conditions	867	3	1
Итого по выборке:	13 371	9	8

Для оценки точности разработанного алгоритма используем три метрики: точность и полноту определения пиков ФПГ, а также F1-меру.

Точность определяется по формуле (2), полнота по формуле (3), где TP – число верно определенных пиков, FP – число ложных срабатываний, FN – число пропусков.

$$PR = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (2)$$

$$RE = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (3)$$

F1-мера вычисляется по формуле (4), она объединяет в себе информацию о точности и полноте:

$$F1 = \frac{2 \cdot PR \cdot RE}{PR + RE}. \quad (4)$$

Результаты вычислений для каждой базы сигналов сведены в табл. 2.

Оценивая результаты, можно сделать вывод об эффективной работе предложенного алгоритма вне зависимости от частоты дискрети-

зации исходного сигнала, а также о возможности его применения в реальных задачах.

Таблица 2

Результаты оценки точности работы алгоритма

База сигналов	Точность, %	Полнота, %	F1-мера, %
КНИТУ-КАИ	99,96	99,88	99,91
BIDMC PPG and Respiration Dataset	99,95	100	99,97
Video Pulse Signals in Stationary and Motion Conditions	99,65	99,88	99,76
Итого по выборке:	99,93	99,94	99,93

В дальнейшем алгоритм может быть применен в задачах анализа вариабельности сердечного ритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. A Real-Time PPG Peak Detection Method for Accurate Determination of Heart Rate during Sinus Rhythm and Cardiac Arrhythmia / D. Han, S.K. Bashar, J. Lázaro, F. Mohagheghian, A. Peitzsch, N. Nishita, E. Ding, E.L. Dickson, D. DiMezza, J. Scott et al. // Biosensors. – 2022. – Vol. 12. – P. 82. <https://doi.org/10.3390/bios12020082>
2. Pan J. Real-Time QRS Detection Algorithm / J. Pan, W.J. Tompkins // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 1985. – Vol. BME-32, No. 3. – P. 230–236.
3. BIDMC PPG and Respiration Dataset [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://archive.physionet.org/physiobank/database/bidmc/> свободный (дата обращения: 13.03.2025).
4. Video Pulse Signals in Stationary and Motion Conditions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://archive.physionet.org/physiobank/database/video-pulse/> свободный (дата обращения: 13.03.2025).

УДК 53.096

**СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛАСТИЧНЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ
ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЛЕЧЕНИЯ
САРКОМЫ КОСТЕЙ**

*Д.В. Шмаков, А.Д. Таренков, Р.Ю. Журавлёв, студенты каф. ПрЭ
Научный руководитель Д.О. Пахмурин, к.т.н, доцент каф. ПрЭ
Проект ГПО ПрЭ-2401. Оборудование для высокотемпературного
воздействия для лечения онкологических заболеваний
г. Томск, ТУСУР, atarenkov.jr@gmail.com*

Обсуждается разработка гибкого нагревателя с применением силиконового компаунда и исследование путей его усовершенствования.

Ключевые слова: саркома костей, компаунд, гибкий нагреватель, гипертермия.

Саркомы костей представляют собой группу злокачественных новообразований, возникающих из костной ткани или ее производных. Это редкие, но агрессивные опухоли, поражающие исключительно детей и молодых людей. Совершенствование методов лечения является ключевым для улучшения прогноза и повышения качества жизни больных с этим заболеванием [1].

На базе ТУСУРа был разработан комплекс локальной гипертермии «Феникс-2» (КЛГ «Феникс-2», предназначенный, в том числе, для лечения сарком костей путем нагрева).

Целью данной работы является разработка технологии изготовления гибких нагревателей для КЛГ «Феникс-2».

Нагреватель представляет собой эластичную пластину толщиной менее 5 мм и размерами от 50×50 до 300×50 мм. Внутри по всей плоскости нагревателя распределен нагревательный элемент.

В качестве эластичной оболочки было принято решение использовать термостойкий заливочный двухкомпонентный силиконовый компаунд пентэласт-711 А. Данный компаунд прошел сертификацию на интраоперационное применение в медицине. Герметик пентэласт-711 А – термостойкий заливочный двухкомпонентный силиконовый компаунд, предназначенный для склеивания металлических и неметаллических поверхностей, в том числе силиконовой резины горячей и холодной вулканизации, для герметизации и электроизоляции приборов, эксплуатирующихся в среде воздуха и в условиях повышенной влажности при температурах от –60 до +250 °С [2].

Изначально заливка нагревателя происходила в двухсоставной форме. Нагревательный элемент зажимался между двумя частями формы до полного застывания. При данном методе заливки наблюдались дефекты в виде воздушных карманов и смещения нагревательного элемента внутри компаунда, что приводило к потере герметичности и нарушению работоспособности нагревателя.

На смену предыдущему методу изготовления эластичного нагревателя пришел двухэтапный метод. Метод заключается в следующем: в малой по высоте форме разводятся паста и катализатор, затем после застывания получившаяся подложка помещается в форму большей высоты. Поверх подложки кладется нагревательный элемент, покрытый дипольной пленкой, и снова заливается раствором. Дипольная пленка в данном случае используется как защита от попадания влаги во время калибровки и проведения операции на поверхность нагревательного элемента, исключая тем самым его коррозию и выход из строя.

Дополнительно для удаления из состава компаунда основного количества воздуха, образовавшегося в процессе заливки, использует-

ся вакуумная камера, которая позволяет тем самым увеличить качество изготовления и прочность гибкого нагревателя.

В результате использования нового метода изготовления мы получаем гибкий нагреватель, который не имеет недостатков, возникающих при использовании старого способа изготовления. Получающийся нагреватель может быть использован и при калибровке в водном термостате, и при применении во влажной среде операционной раны, что повышает сроки его использования и снижает стоимость проведения операции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, номер проекта FEWM-2024-0003.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саркомы костей [Электронный ресурс]. – URL: <https://goo.su/tUVkT>.
2. Компаунд пентэлэст-711 А [Электронный ресурс]. – URL: https://pentasever.ru/catalog/dvukhkomponentnye_kompaundy_i_germetiki/elektroizolyatsionnye_kompaundy_i_germetiki/kompaund_pentelast_711_marok_a_i_b/

УДК 53.097

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ПОРОШКОВОГО ХЛОРИДА КАЛИЯ

А.А. Швадленко, Н.Ф. Яровая, студенты каф. КУДР

*Научный руководитель С.Г. Еханин, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н.
г. Томск, ТУСУР, alisashvadlenko@gmail.com*

Проведены измерения энергетического спектра радиоактивности порошкообразного хлорида калия, содержащего естественный радиоактивный изотоп К-40. Показано, что кроме радиоактивного изотопа калия в спектре регистрируется присутствие и других изотопов. Это может сказываться на результатах исследования влияния лазерного излучения на изменение интенсивности радиоактивности как порошкообразного, так и кристаллического хлорида калия.

Ключевые слова: активация радиоактивных отходов, фоновое колебание радиоактивного распада.

Имеется ряд публикаций, в которых приведены результаты, доказывающие влияние на скорость распада радиоактивных материалов мощных пучков электромагнитного излучения [1–3]. Ранее [4] мы провели эксперимент, направленный на оценку влияния лазерного излучения на радиоактивный распад кристаллического хлорида калия. С использованием нового оборудования, позволяющего проводить

измерения энергетических спектров радиоактивных веществ, появились новые возможности для исследования этого эффекта.

В данной работе приводятся результаты измерения энергетических спектров порошка хлорида калия (KCl) с целью определения его изотопного состава.

Описание экспериментальной установки и методики исследования. Экспериментальная установка включает в себя датчик со сцинтилляционным кристаллом (Radiacode 101), позволяющим измерять энергетические спектры радиоактивных изотопов, программное обеспечение (ПО) к нему и персональный компьютер. Объектом исследования является порошкообразный KCl, содержащий в качестве естественной примеси некоторое количество радиоактивного изотопа K-40. Эксперимент проходил в следующем порядке: вначале измерялся энергетический спектр фонового излучения (без KCl), а потом это же время измерялся энергетический спектр порошка KCl.

Результаты исследования и обсуждение. На рис. 1 представлены энергетические спектры фонового излучения и излучения порошка KCl.

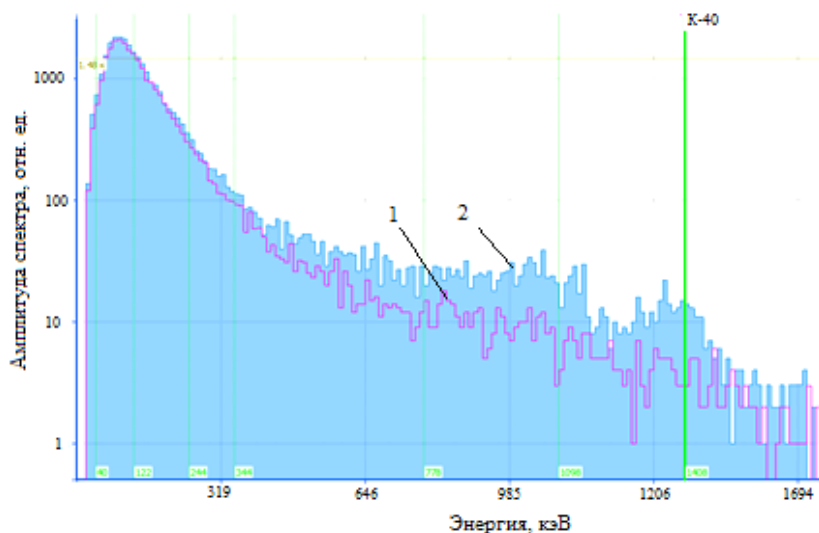


Рис. 1. Спектры фонового излучения (1) и излучения порошка KCl (2)

Как видно из рисунка, спектры имеют существенные отличия, особенно в высокоэнергетической области. Как и ожидалось, имеется максимум, обусловленный излучением изотопа K-40, линией показана энергия этого изотопа, выявленная и опознанная ПО. Однако, кроме этого, выявляется наличие и других радиоактивных изотопов: Bi-214,

As-228, Eu-152, Co-60, Ra-234, следы изотопа Tl и др. Если рассмотреть причину их появления, то очевидно, что это примеси, содержащиеся в порошке KCl. Большинство примесей содержится, например, в морской воде или в воде соленых озер и могут оставаться в порошке KCl при выпаривании.

Заключение. Полученные результаты продемонстрировали, что помимо радиоактивного изотопа K-40 в порошкообразном, а следовательно, и в кристаллическом KCl существует определенное количество других изотопов. Их присутствие может влиять на результаты исследования воздействия лазерного излучения на скорость распада изотопов в образцах KCl.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тернов И.М. Влияние сильного электромагнитного поля на бета-распад // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1989. – Т. 20, № 1. – С. 51 – 96.
2. Коробкин В.В. Возбуждение ядер под действием сильного лазерного поля / В.В. Коробкин, М.Ю. Романовский // Труды Института общей физики РАН. – 2000. – Т. 57. – С. 3–27.
3. Андреев С.Н. Обнаружение эффекта влияния импульсного лазерного излучения на радиоактивный распад Cs-137 в коллоидном растворе золота / С.Н. Андреев, Е.В. Бармина, В.Г. Калинин // Письма в ЭЧЕА. – 2017. – Т. 14, № 6 (211). – С. 630–636.
4. Еханин С.Г. Исследование эффективности дезактивации кристаллов KCl под действием лазерного излучения / С.Г. Еханин, А.А. Швадленко // Электронные средства и системы управления: матер. докладов XX Междунар. науч.-практ. конф., 20–22 ноября 2024 г.: в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр (ИП Бочкарева В.М.), ТУСУР. – С. 144–146.

УДК 53.043

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Е.В. Парахина, А.А. Швадленко, студенты каф. КУДР

*Научный руководитель С.Г. Еханин, проф. каф КУДР, д.ф.-м.н.
г. Томск, ТУСУР, alisashvadlenko@gmail.com*

Проведено изучение зависимости эффективности излучения из активной области, определение частоты среза и расчет времени жизни носителей заряда по динамическим характеристикам электролюминесценции сверхъярких светодиодов на основе InGaN/GaN.

Ключевые слова: светоизлучающий диод, ватт-амперная характеристика, внутренняя квантовая эффективность.

Эффективность излучения из активной области светоизлучающего диода (СИД), т.е. внутренняя квантовая эффективность (ВКЭ) связана с качеством активного слоя гетероструктуры. Традиционно экспериментальные исследования ВКЭ основываются на измерении ватт-амперных характеристик СИД в статическом режиме [1]. Измерения ватт-амперных характеристик электролюминесценции СИД на переменном напряжении позволяют получать информацию о характеристических временах жизни носителей заряда в квантовых ямах полупроводниковых гетероструктур, а значит, позволяют определять ВКЭ.

Цель работы заключается в измерении частотных зависимостей ватт-амперных характеристик электролюминесценции сверхъярких светодиодов на основе InGaN/GaN, определении характеристической частоты и расчете ВКЭ.

Вывод расчетных формул. Для определения ВКЭ (η_{int}) СИД необходимо рассчитать отношение количества фотонов, образовавшихся в его активной области, к количеству электронов, прошедших через нее в единицу времени. ВКЭ может быть рассчитана по формуле [2]

$$\eta_{\text{int}} = \frac{P \cdot e \cdot \lambda}{\eta_{\text{extr}} \cdot I \cdot \hbar c}, \quad (1)$$

где P – мощность излучения света, выходящего за пределы кристалла СИД, I – ток через активную область, e – заряд электрона, λ – длина волны излучения, $\hbar$ – постоянная Планка, c – скорость света в вакууме, η_{extr} – коэффициент выхода квантов света из гетероструктуры.

ВКЭ можно определить и по-другому. Как указано в [3], ВКЭ определяется вероятностью излучательной и безызлучательной рекомбинации носителей заряда в единицу времени:

$$\tau^{-1} = \tau_r^{-1} + \tau_{nr}^{-1}, \quad (2)$$

где τ_r – время жизни носителей заряда при излучательной, а τ_{nr} – при безызлучательной рекомбинации.

Таким образом, после некоторых преобразований можно получить отношение вероятности излучательной рекомбинации к сумме вероятностей излучательной и безызлучательной рекомбинации.

Как указано в [2], время жизни носителей заряда связано с характеристической частотой спада оптической мощности $f_{\text{зdB}}$ выражением:

$$f_{\text{зdB}} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \frac{1}{\tau} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_{nr}} \right). \quad (3)$$

Используя уравнения (1)–(3), можно получить выражение для расчета ВКЭ по динамическим ватт-амперным характеристикам электролюминесценции сверхъярких СИД на основе InGaN/GaN.

Методика исследования. Динамические характеристики измерялись с помощью генератора прямоугольных импульсов FG-7020A. Генератор позволяет плавно изменять амплитуду и частоту импульсов напряжения, подаваемых на светодиод. С помощью люксметра, который измерял световой поток и освещенность, оценивалась мощность излучения при разных малых токах через СИД в зависимости от частоты. Так определялась $f_{з\delta\beta}$. При экспериментальных измерениях люксметр и светодиод располагаются одинаково, чтобы обеспечить воспроизводимость результатов.

Экспериментальные результаты и обсуждение. Исследования ватт-амперных характеристик СИД проводились при одной величине тока, но при разной частоте возбуждающего напряжения. С увеличением частоты мощность излучения уменьшается, что свидетельствует о том, что время жизни носителей заряда становится соизмеримым с периодом подачи импульсов электрического возбуждения. При увеличении частоты от 1 до 300 кГц мощность излучения уменьшилась примерно в 2 раза (на 3 дБ), т.е. можно считать, что частота 300 кГц является искомой частотой $f_{з\delta\beta}$ (см. формулу (3)).

Зная величину $f_{з\delta\beta}$, можно найти время жизни носителей заряда при излучательной рекомбинации τ_r . Это можно сделать, если измерить в этих условиях мощность излучения, величину тока через СИД и коэффициент выхода света наружу и активной области η_{extr} (см. формулу (1)). Аналогично можно получить значения τ_{nr} .

И, наконец, вычислив значения τ_r и τ_{nr} , по формуле (2) можно определить и значение внутренней квантовой эффективности.

Заключение. Таким образом, разработанная и опробованная в данной работе методика позволяет осуществлять экспресс-диагностику кристаллов СИД, производимых из покупных InGaN/GaN пластин, что в дальнейшем позволит выбирать более оптимальный вариант из предлагаемых производителями образцов.

Выражаем благодарность сотрудникам отдела № 110 АО «НИИПП» С.А. Санько, М.С. Майбах, М.И. Воротникову, Ю.А. Хотненко, Р.А. Гальченко за предоставленные образцы для исследования и активное участие в обсуждении полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сергеев В.А. Измеритель внутренней квантовой эффективности светодиода / В.А. Сергеев, О.А. Радаев, И.В. Фролов // Приборы и техника эксперимента. – 2023. – № 6. – С. 103–110.
2. Фролов И.В. Динамические характеристики, квантовая эффективность отдельных спектральных составляющих излучения InGaN светодиодов / И.В. Фролов, В.А. Сергеев, О.А. Радаев // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 9 [Электронный журнал]. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep18/7/text.pdf>.
3. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ.; под ред. А.Э. Юновича. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.

**ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭПИКАРДИАЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЭКГ В РАННЕМ
ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОМ ПЕРИОДЕ У ПАЦИЕНТОВ
КАРДИОХИРУРГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ**

А.М. Коновалов, И.В. Зелинский, студенты ПИШ;

Е.И. Тренкаль, доцент каф. КУДР, к.т.н.;

А.В. Берестов, инженер СКБ «Смена»;

*Ш.Д. Ахмедов, проф., вед. н.с. отд. сердечно-сосудистой хирургии
НИИ кардиологии Томского НИМЦ, д.м.н.*

г. Томск, ТУСУР, arsenii.konovalov@tusur.ru, igor.zelinskii@tusur.ru

Рассматриваются преимущества использования эпикардиальных электродов для повышения качества ЭКГ-мониторинга у кардиохирургических пациентов и технологий перед традиционными поверхностными электродами, включая минимизацию артефактов и более точное распознавание нарушений ритма.

Ключевые слова: эпикардиальные электроды, послеоперационный период, ЭКГ-мониторинг, кардиохирургия.

Мониторинг электрической активности сердца в раннем послеоперационном периоде играет ключевую роль в предотвращении и своевременной коррекции возможных нарушений ритма у пациентов после кардиохирургических вмешательств. Аритмии возникают у 30–60% пациентов после проведения кардиохирургических операций, повышая риск инсульта, летальности и удлинённой госпитализации [1].

Одним из новых и перспективных подходов для ЭКГ-мониторинга является использование двух временных эпикардиальных электродов, подшиваемых к поверхности сердца человека после проведения открытых операций на сердце для профилактики возможных осложнений. Потенциально снятие ЭКГ с эпикардиальных электродов должно обеспечить более точное и стабильное считывание сигналов по сравнению с традиционными электродами с накожной фиксацией.

В ранее опубликованной работе [2] было предложено устройство, которое регистрирует сигналы ЭКГ с эпикардиальных электродов и анализирует его преимущества перед традиционными методами регистрации. Особое внимание уделено техническим аспектам обработки сигналов и снижению шумов для повышения точности диагностики. В рамках данной работы выполнен сравнительный анализ ЭКГ, полученных предложенным устройством, с данными, зарегистрированными традиционным методом на основе применения трех поверхностных электродов.

Исследования проводились на основе данных, полученных от 10 пациентов, находящихся в раннем послеоперационном периоде. Анализ собранных данных позволил выявить ключевые параметры и особенности функционирования системы.

При снятии ЭКГ с двух электродов, подшитых к сердцу, сигнал регистрируется максимально близко к его источнику, что обеспечивает высокую амплитуду и минимальный уровень шума. Для регистрации использовался датчик сердечного ритма AD8232, обеспечивающий фильтрацию, усиление и предварительную обработку сигнала.

Такое расположение позволяет исключить влияние тканей тела и кожных артефактов, благодаря чему сигнал отличается высокой чистотой, как показано на рис. 1.

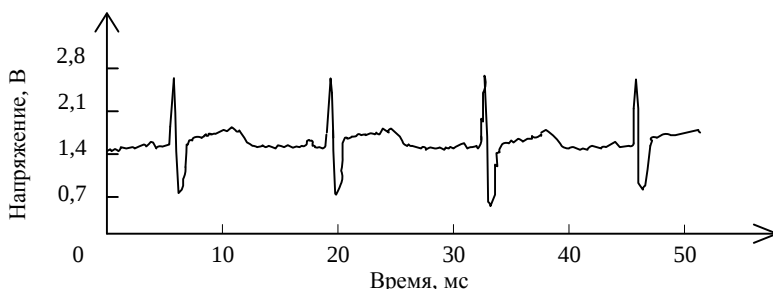


Рис. 1. ЭКГ, снятая с использованием эпикардиальных электродов

Эпикардиальные электроды обеспечивают четкую визуализацию предсердной активности. В предсердной электрограмме (ПЭГ) зубцы Р имеют высокую амплитуду, поскольку сигнал снимается прямо с миокарда. Это улучшает различение предсердных и желудочковых событий, повышая точность диагностики аритмий [3].

Подшитые электроды надежно фиксируются, снижая риск потери контакта. Это повышает надежность мониторинга и снижает вероятность пропущенных эпизодов аритмии. Кроме того, они при необходимости позволяют проводить временную электрокардиостимуляцию, что дает возможность немедленного лечения брадиаритмий.

В случае использования трех электродов, размещенных на поверхности тела, например на конечностях или грудной клетке, электрический сигнал проходит через ткани организма, что приводит к снижению его амплитуды и добавляет шумовые помехи, как показано на рис. 2.

Результаты анализа показали, что эпикардиальные электроды обеспечивают значительно более высокую амплитуду сигнала за счет непосредственного контакта с миокардом и отсутствия кожного со-

противления. Средняя амплитуда комплекса QRS в 2–3 раза превышает показатели поверхностной ЭКГ, что критично для диагностики аритмий. Соотношение сигнал/шум также выше благодаря минимизации мышечных и дыхательных артефактов. Кроме того, эпикардальная регистрация демонстрирует устойчивость к артефактам движения, обеспечивая стабильное качество сигнала.

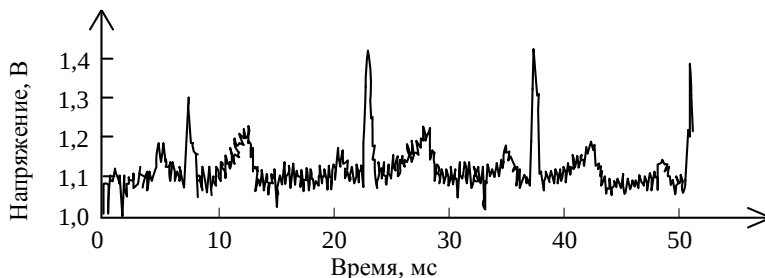


Рис. 2. ЭКГ, снятая с использованием кожных электродов

Результаты проведённых исследований стали важной основой для разработки новых медицинских устройств, направленных на повышение точности мониторинга и улучшение качества диагностики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Somasundaram N. First-in-human use of a continuous real-time atrial electrogram monitoring device after cardiac surgery / N. Somasundaram, J.K. Boadu, N.H. Von Bergen // *HeartRhythm Case Rep.* – 2021. – No. 7 (4). – P. 251–254.
2. Коновалов А.М. Система мониторингирования нарушений ритма сердца у больных раннего послеоперационного периода в сердечно-сосудистой хирургии / А.М. Коновалов, Е.И. Тренкаль, Ш.Д. Ахмедов // *Электронные средства и системы управления: матер. докл. XX Междунар. науч.-практ. конф., 20–22 ноября 2024 г.: в 2 ч. – Ч. 1.* – Томск: В-Спектр (ИП Бочкарева В.М.), ТУСУР, 2024. – С. 24–25.
3. Atrial Electrography for Postoperative Tachyarrhythmia Analysis in Patients / A.M. Peotter, D.R. Brown M.R., Kalscheur, N.H. Von Bergen // *J. Innov Card Rhythm Manag.* – 2021. – No. 12 (10). – P. 4726–4743.

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА МЕДИЦИНСКИХ ИМПЛАНТОВ НА ИХ ПРИЖИВАЕМОСТЬ (ОБЗОР)

Н.М. Мироненко, аспирант ИШНКБ;

А.И. Солдатов, проф., д.т.н.; С.И. Борталевич, проф., д.э.н.;

К.Х. Зоидов, вед. н.с., доцент, к.ф.-м.н.

Научный руководитель А.И. Солдатов, проф. ИШНКБ, д.т.н.

г. Томск, ТПУ, nmm5@tpu.ru

Рассматривается влияние электростатических параметров материалов на свойства медицинских имплантов. Проводится обзор функций электрических зарядов в биологических процессах организма.

Ключевые слова: электростатический заряд, медицинские импланты, электреты.

Исследование и совершенствование свойств искусственных имплантов – одно из передовых направлений современной медицины. Процедура замены повреждённых тканей и органов на здоровые уже давно вошла в медицинскую практику, однако данный подход имеет ряд критических недостатков, таких как своевременное отсутствие подходящих доноров, а также большое количество морально-этических проблем, решение которых порой невозможно [1, 2].

Замена биологических тканей и органов искусственными материалами позволяет не только своевременно и в полной мере оказывать необходимую медицинскую помощь, но и избавляет от большого количества вопросов, связанных с морально-этическими нормами. По этой причине множество исследователей разных стран находятся в поиске материалов, их покрытий и способов обработки для наилучшей пригодности в качестве искусственных имплантов [3].

Искусственные импланты на сегодняшний день успешно используются в разных областях медицины (сосудистая хирургия, стоматология и т.д.). В зависимости от назначения используемые материалы и покрытия должны иметь различные физические, химические и электрические свойства [1]. Кроме соответствия материала таким свойствам, как эластичность, пористость, устойчивость к старению в биологически активной среде, структура и рельеф поверхности, материал также должен удовлетворять требованиям по величине и знаку поверхностного статического заряда [3, 4]. Несоответствие материала необходимым требованиям может стать причиной неприживаемости импланта либо его преждевременного разрушения.

Проводимые исследования влияния электрических зарядов на биологические процессы в организме человека показывают, что электрическими параметрами материалов, предназначенных для изготовления имплантов, пренебрегать нельзя. Так, клинически подтверждена эффективность использования электростатических стимуляторов, вживляемых внутрь суставов, при лечении гонартроза [5]. Воздействие электростатического поля электрета способствует установлению оптимальных биоэлектрических параметров костной и хрящевой ткани для их восстановления. Главными результатами применения этого метода стало снижение болевого синдрома у пациентов и уменьшение рисков дальнейшего развития патологии. Таким образом, применение электростатических стимуляторов является альтернативой дорогостоящей и связанной с большим количеством рисков операции эндопротезирования коленного сустава [5].

Электростатические характеристики материалов важно учитывать не только при использовании остеостимуляторов. Не меньшим научным интересом исследователей является электрический заряд биологических тканей и клеток крови, а также возникающие под его действием процессы в организме. Согласно исследованиям, электрический заряд играет немалую роль, кроме прочего, в процессе заживления ран благодаря наличию трансэпителиального потенциала. При повреждении кожи в ране образуются участки с пониженным сопротивлением, благодаря чему вокруг раны наводится электрическое поле, способствующее возникновению тока, направленного к ране со всех сторон, и, как следствие, заживлению. В процессе заживления раны сопротивление повреждённого участка эпителия увеличивается, а ток, соответственно, снижается [6].

Подобные исследования доказывают, что при разработке имплантов любого типа необходимо рассматривать вопрос, о том, как поверхностный потенциал используемого материала может повлиять на биологические процессы и тем самым отразиться на приживаемости имплантата. Например, клетки крови имеют потенциал, аналогичный по знаку (отрицательный) потенциалу поверхности кровеносных сосудов, соответственно, сосудистые импланты должны иметь также отрицательный заряд. Очевидно, что положительно заряженная поверхность имплантата станет причиной нежелательного накопления отрицательно заряженных тромбоцитов внутри искусственного сосуда, что может привести к образованию тромба [4, 7].

Дентальные импланты также имеют высокие требования, определяющие их биосовместимость. Одними из главных требований к свойствам материала являются прочность и рельеф его поверхности.

Топография его поверхности влияет на уровень приживаемости импланта, а прочность необходима для обеспечения стойкости к физическим воздействиям. Материалами, удовлетворяющими большей части требований, является титан и его сплавы [8]. Также сплавы титана пользуются популярностью при создании устройств поддержания кровообращения, искусственных клапанов и эндоваскулярных стентов [3].

В статье «Применение методов атомно-силовой микроскопии для контроля параметров поверхности покрытий медицинских имплантов» [9] приводятся результаты исследования пластин титана с помощью зондовой силовой микроскопии. В исследовании использовались образцы пластин, поделённые на группы по материалам, формирующим их покрытия. Предметом научного интереса являлись покрытия, применимые и используемые в биологии и медицине.

По результатам исследования выяснилось, что фактором, играющим определяющую роль в формировании величины и знака поверхностного потенциала, является не материал подложки, а материал покрытия. Такой вывод был заключён после исследования картины распределения поверхностного заряда, полученной методом зондовой силовой микроскопии, – образцы с разными видами покрытия оказывались различными по значению заряда и противоположными по знаку [9].

Подобный результат может иметь практическую ценность для установки потенциала необходимого знака и величины на поверхности разрабатываемого импланта, а также для создания прогнозируемых изменений поверхностного потенциала при нарушениях целостности поверхности. Общая же тенденция к внедрению в медицину практики применения искусственных имплантов становится причиной повышения спроса на технические устройства, способные проводить точные измерения электростатического потенциала на поверхности материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. The possibility of using laser surface engineered titanium alloy implants as a treatment for cardiovascular diseases / A. Mthisi, A.P.I. Popoola, L.R. Kanyane et al. // *Biomedical Engineering Advances*. – 2024. – Vol. 8 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667099224000203>, свободный (дата обращения: 03.03.2025).

2. Викторук Е.Н. Биоэтика. Лекции и материалы к практическим занятиям: учеб. пособие / Е.Н. Викторук, В.В. Минеев. – Красноярск: Краснояр. гос. пед. ун-т им. В.П. Астафьева, 2017. – 140 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://career.krasn.ru/upload/medialibrary/cbb/cbb3da4d28f9ee1c9d14b2dc041a79c4.pdf>, свободный (дата обращения: 03.03.2025).

3. К вопросу о выборе материала для создания сосудистых имплантов: обзор литературы / В.А. Липатов, С.В. Лазаренко, Д.А. Северинов, Е.А. Матвеева // Науч. элект. журнал «INNOVA». – 2016. – № 2 (3). – С. 44–50 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-vybere-materiala-dlya-sozdaniya-sosudistyih-implantov>, свободный (дата обращения: 03.03.2025).

4. Снижение риска тромбоза и рестеноза при использовании стентов с электретым отрицательно заряженным покрытием / М. Фишман, М. Княжанская, А.З. Немец, А. Цун // Альманах клинической медицины. – 2017. – Т. 45, № 3. – С. 234–241 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://almclin.med.ru/jour/article/view/544/548>, свободный (дата обращения: 03.03.2025).

5. Применение электростатического поля электрета при хирургическом лечении больных гонартрозом / Д.Ю. Вансович, М.С. Сердобинцев, В.В. Усиков и др. // Пульс. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 24–30 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-elektrostaticheskogo-polya-elektreta-pri-hirurgicheskom-lechenii-bolnyh-gonartrorozom>, свободный (дата обращения: 03.03.2025).

6. Nuccitelli R. A role for endogenous electric fields in wound healing // Current Topics in Development Biology. – 2003. – Vol. 58. – P. 1–26 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/8929511_A_Role_for_Endogenous_Electric_Fields_in_Wound_Healing, свободный (дата обращения: 03.03.2025).

7. Controlling Cell Behavior Electrically: Current Views and Future Potential / C.D. McCaig, A.M. Rajnicek, B. Song, M. Zhao // Physiol Rev. – 2005. – Vol. 85 (3) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/physrev.00020.2004?rfr_dat=cr_pub++0pubmed&url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori%3Arid%3Acrossref.org, свободный (дата обращения: 03.03.2025).

8. Кулаков А.А. Факторы, влияющие на остеоинтеграцию и применение ранней функциональной нагрузки для сокращения сроков лечения при денальной имплантации / А.А. Кулаков, А.С. Каспаров, Д.А. Порфенчук // Стоматология. – 2019. – Т. 98, № 4. – С. 107–115 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mediasphera.ru/issues/stomatologiya/2019/4/downloads/ru/1003917352019041107>, свободный (дата обращения: 03.03.2025).

9. Применение методов атомно-силовой микроскопии для контроля параметров поверхности покрытий медицинских имплантов / В.А. Клименов, С.И. Твердохлебов, Е.Н. Бельбасов и др. // Дефектоскопия. – 2011. – № 11. – С. 69–82.

ПОДСЕКЦИЯ 2.2

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

*Председатель – Бомбизов А.А., начальник СКБ «Смена», к.т.н.
зам. председателя – Тренкаль Е.И., доцент каф. КУДР, к.т.н.*

УДК 621.3

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАРЯДА НА ОБШИВКЕ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

А.А. Артюшин, аспирант каф. РЭС;

А.М. Телегин, доцент каф. РЭС, к.ф.-м.н.

г. Самара, Самарский университет, artyushin.aa@ssau.ru

Рассматривается вариант построения системы измерения поверхностного потенциала космического аппарата и его распределения по поверхности с использованием метода индуцированного лазерного излучения. В результате была разработана функциональная схема устройства.

Ключевые слова: электризация, поверхностный заряд, космический аппарат, датчик электризации.

Во время эксплуатации космического аппарата в результате его взаимодействия с космическим пространством на поверхности обшивки может возникать электрический заряд. При его накоплении происходит процесс зарядки обшивки, что может приводить к возникновению электромагнитных помех, а также к электрическим пробоям, которые могут вывести космический аппарат или часть его целевой аппаратуры из строя [1–7]. Таким образом, для повышения надежности и сроков возможной эксплуатации необходимо измерять величину поверхностного заряда. В данной статье предлагается вариант построения прибора, позволяющего измерять распределение поверхностного заряда на поверхности космического аппарата.

Для построения распределения заряда необходимо использовать прямоугольную матрицу электродов, выступающих в роли датчиков электризации.

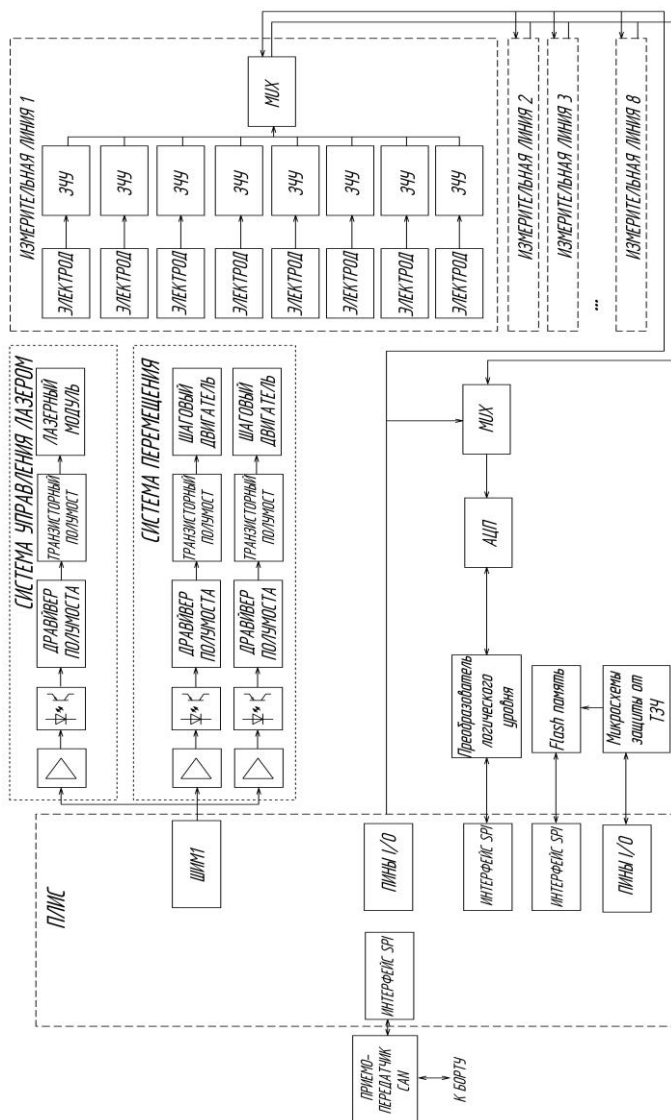


Рис. 1. Функциональная схема устройства

В качестве метода измерения был выбран метод индуцированного лазерного излучения, поэтому для получения данных с электродов необходима засветка (рис. 1). Для этого предусмотрена система

управления лазером и для поочередной засветки датчиков система перемещения лазера. Лазер управляется с помощью ШИМ, который подается на транзисторный полумост через оптрон для обеспечения гальванической развязки. Для увеличения токовой нагрузки порта ПЛИС используются буферы-повторители. Система перемещения состоит из двух шаговых двигателей, обеспечивающих перемещение вдоль оси X и Y лазера, которые управляются аналогичным образом.

Выходы электродов подключены к зарядочувствительным усилителям (ЗЧУ), которые, в свою очередь, подключаются к системе мультимплексоров для обеспечения обработки данных с большого количества датчиков. После мультимплексирования сигналы с зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ) попадают на АЦП и обрабатываются с помощью ПЛИС, данные сохраняются во встроенную Flash-память. Для повышения надежности записи данных предусмотрены микросхемы защиты от тиристорного эффекта, а также алгоритм мажорированной записи данных.

Связь с бортовой системой обеспечивается с помощью интерфейса CAN.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перспективные направления построения бортовых систем контроля электризации поверхности КА / К.Е. Воронов, А.М. Телегин, Г.И. Леонович, А.А. Артюшин // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – Самара: Артель, 2023. – С. 13–18.
2. Акишин А.И. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов / А.И. Акишин, Л.С. Новиков. – М.: Знание, 1983. – 64 с.
3. Электризация поверхности низкоорбитального малого космического аппарата АИСТ / Н.Д. Семкин, В.В. Брагин, А.В. Пияков, А.М. Телегин, Д.М. Рязанов, М.Г. Матвиец // Вестник Самар. гос. аэрокосмического ун-та. – 2015. – Т. 14, № 1. – С. 46–57.
4. Spacecraft potential during an active experiment a comparison of experimental results with a simple model / P. Zilavy, L. Prech, Z. Nemecek, J. Safrankova // *Annales Geophysicae*. – 2013. – С. 915–922.
5. Модели и методы воздействия электростатического разряда, применяемые при моделировании, проектировании и испытаниях радиоэлектронных средств / А.А. Дроздова, М.Е. Комнатов // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 44–70.
6. Dr. Maciej A.Noras. Charge Detection Methods for Dielectrics – Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.advancedenergy.com/getmedia/20165f08-081a-4d80-8404-584723deb56b/en-esvm-charge-detection-methods-application-note.pdf>, свободный (дата обращения: 25.01.2025).
7. Артюшин А.А. Обзор перспективных методов измерения поверхностного потенциала космического аппарата / А.А. Артюшин, А.М. Телегин // Матер. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления»: в 2 ч. – Томск: В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева), ТУСУР, 2024. – Ч. 1. – С. 121–123.

КОМПАКТНАЯ УСТАНОВКА КОНТРОЛЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТЕОCUBE

И.А. Деев, К.А. Чеботарёв, М.А. Маджиль, студенты ИЯТШ

г. Томск, НИ ТПУ, kac19@tpu.ru

Разработана компактная метеостанция для климат-контроля в домашних условиях, позволяющая измерять температуру, влажность и силу (скорость) ветра. Для оценки точности измерений и проверки надежности работы установки в условиях эксплуатации был проведен ряд испытаний, в результате которых установка продемонстрировала эффективный мониторинг климата.

Ключевые слова: метеостанция, датчик, схема, Arduino.

В настоящее время повсеместно применяются метеостанции, в том числе доступные обычному человеку для их использования в домашних условиях. Актуальность проекта обусловлена растущим интересом к персонализированному мониторингу окружающей среды и возможностью применения полученных данных для различных целей, таких как оптимизация микроклимата в помещении.

Проект «МетеоCube» заключается в разработке компактной домашней метеостанции, созданной на базе платформы Arduino. Целью проекта являлось создание функционального и доступного устройства для мониторинга ключевых метеорологических параметров, таких как температура, влажность, атмосферное давление, скорость ветра. В рамках проекта проводилось изучение электротехники и практическое освоение навыков работы со средой разработки программного кода и с датчиками. Была разработана метеостанция, которая опрашивает совокупность датчиков Arduino и выводит на дисплей текущие значения наиболее распространенных метеорологических характеристик окружающей среды. Также вывод данных с анемометра производится на моторчик, а вывод данных с термометра осуществляется на панель светодиодов.

Для корпуса метеостанции был выбран экологичный и легкий материал – картон. Он не только обеспечивает защиту внутренней конструкции прибора, но и служит платформой для размещения световых индикаторов температуры и влажности.

Сбор данных о текущих значениях метеорологических характеристик осуществляется с помощью датчика измерения температуры и влажности окружающей среды DHT11 и анемометра М-852-Мх, подключенных в соответствии со схемой, представленной на рис. 1.

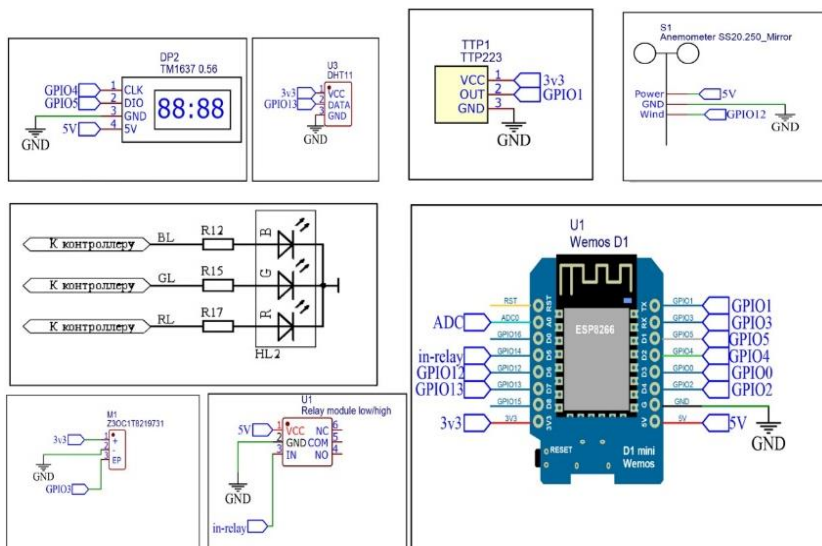


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная установки «MeteoCube»

В рамках экспериментов была проверена правильность индикации результатов измерений на светодиодах и анемометре, а также точность измерений физических величин используемыми датчиками. Эксперименты показали, что датчики позволяют получать значения метеорологических характеристик с точностью до ± 1 °C, до $\pm 2\%$ относительной влажности, до 3% от км/ч. Правильность полученных значений была проверена путем сравнения с эталоном, в качестве которого выступали другие средства измерения, например термометр.

Разработанная компактная метеостанция «MeteoCube» призвана помочь пользователю в ряде ситуаций, связанных с климатом уличной среды, например для планирования прогулок. Компактность метеостанции позволяет аккуратно вписать её в интерьер дома и мобильно перемещать «MeteoCube» по квартире.

ЛИТЕРАТУРА

1. DHT11 humidity and temperature sensor datasheet [Электронный ресурс]: AOSONG Electronics CO., LTD. – URL: <https://iarduino.ru/lib/11df3b397247a33c36afc08a64ee9d50.pdf> (дата обращения: 15.03.2025).
2. Чашечный анемометр [Электронный ресурс]: Википедия: свободная энцикл. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Анемометр> (дата обращения: 15.05.2024).

ПОДСЕКЦИЯ 2.3

ФИЗИЧЕСКАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Председатель – Троян П.Е., проф. каф. ФЭ, д.т.н.;
зам. председателя – Смирнов С.В., проф. каф. ФЭ, д.т.н.

УДК 539.231

ФОРМИРОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ YSZ-КЕРАМИКИ В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ

А.К. Нестеренко, магистрант каф. ПИШ;

А.А. Андронов, аспирант каф. физики

Научный руководитель А.В. Тюньков, доцент каф. физики, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, alex27.11.01@mail.ru

Представлено исследование влияния условий эксперимента на фазовый состав, микроструктуру покрытия, нанотвердость и модуль упругости покрытия из диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия (YSZ). Получены результаты микроструктуры и фазового состава покрытия YSZ с использованием растровой электронной микроскопии. Также выявлено содержание моноклинной и тетрагональной фаз в структуре покрытия. Представлены результаты измерения нанотвердости и модуля упругости.

Ключевые слова: форвакуумный источник электронов, теплозащитные покрытия, YSZ-керамика.

Современные технологии предъявляют высокие требования к материалам, способным выдерживать экстремальные условия. Керамика на основе диоксида циркония (ZrO_2) обладает комплексом выдающихся свойств: прочностью, термостойкостью, коррозионной устойчивостью и электропроводностью [1], что обуславливает ее широкое применение в различных отраслях. Теплозащитные покрытия (ТЗП) из YSZ широко востребованы в аэрокосмической и нефтегазовой промышленности для повышения эффективности газотурбинных двигателей (ГТД) и увеличения срока службы лопаток турбин.

Целью настоящего исследования является изучение влияния условий эксперимента на характеристики покрытия YSZ, такие как фазовый состав, микроструктура, нанотвердость и модуль упругости.

Методика и техника эксперимента. YSZ-мишень размещалась в графитовом тигле, который, в свою очередь, находился внутри ваку-

умной камеры. Перед началом эксперимента камера подвергалась предварительной откачке до давления 1 Па. Затем в камеру подавался рабочий газ (гелий) до достижения давления 5 Па. Электронный пучок генерировался форвакуумным источником электронов с плазменным катодом и транспортировался сквозь атмосферу рабочего газа. При транспортировке электроны пучка взаимодействовали с атомами рабочего газа и остаточной атмосферы, осуществляя их ионизацию. Пучок позиционировался на YSZ-мишени, вызывая ее испарение. Схема эксперимента более подробно представлена в [2].

Результаты. Изображения поверхности покрытия, полученные при использовании растровой электронной микроскопии, представлены на рис. 1. Как можно отметить, покрытие, полученное в первом случае, отличается большой пористостью и четко различимыми границами треугольных зерен. Размер граней кристаллов от 0,6 до 1 мкм. В случае предварительного нагрева подложки при осаждении паров мишени формируемая структура стала более плотной, состоящей из спрессованных зерен. Такой эффект связан с повышением подвижности атомов, осаждаемых на горячую подложку. Аналогичная картина наблюдается при подаче отрицательного постоянного и импульсного смещения на подложку.

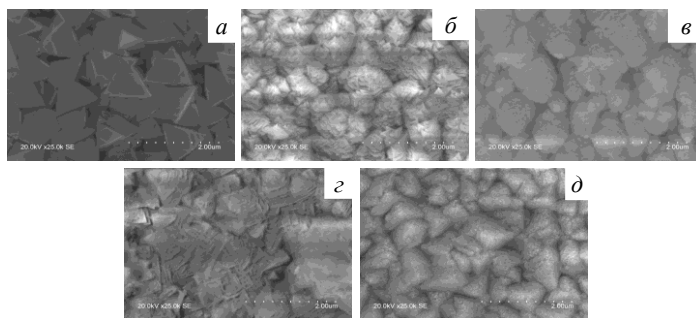


Рис. 1. Результаты растровой электронной микроскопии поверхности: без условий – *a*; предварительный нагрев до 700 °С в течение 10 мин – *б*; постоянное смещение $U = 1$ кВ – *в*; импульсное смещение $U = 1$ кВ – *г*; нагрев после нанесения покрытия в течение 20 мин – *д*

Результаты исследования фазового состава покрытий представлены на рис. 2, *a*. Наибольшее содержание тетрагональной фазы (99%) зафиксировано при предварительном нагреве подложки, однако при отжиге покрытия после нанесения содержание тетрагональной и моноклинной фазы приблизительно равно (55 и 45% соответственно). При подаче отрицательного DC смещения на подложку превалирует

моноклинная фаза (57%), подобный результат наблюдается для покрытия, полученного на образце № 1 (56%). Результаты изменения нанотвердости и модуля упругости полученных покрытий представлены на рис. 2, б. В первом и третьем образце процентное содержание фаз поделено приблизительно поровну, а во втором случае преобладает именно стабилизированная тетрагональная фаза. По-видимому, превращение из тетрагональных в моноклинные увеличивает их объем, создавая напряжение сжатия на поверхности, что приводит к увеличению прочности и твердости.

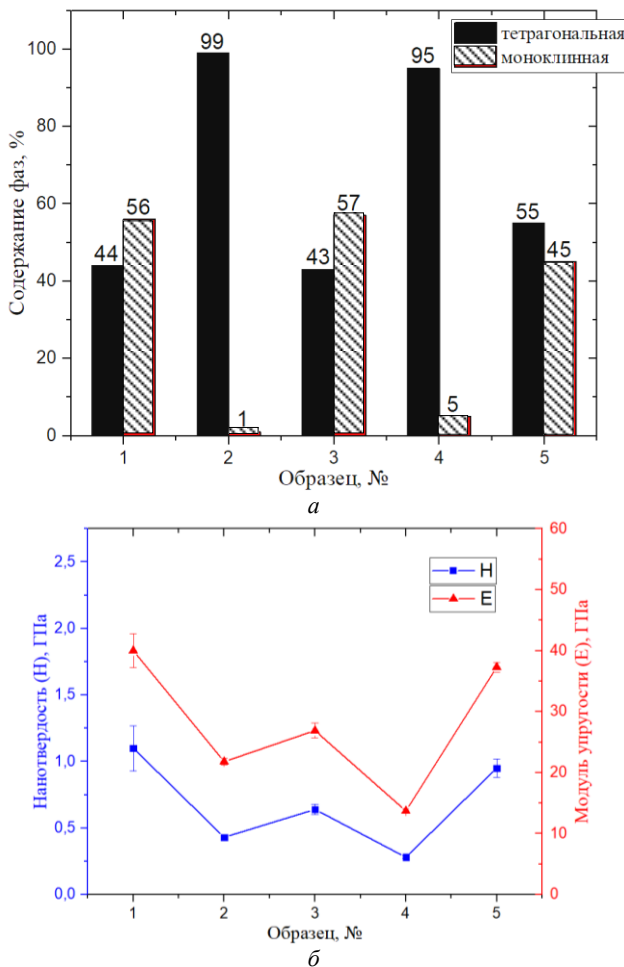


Рис. 2. Фазовый состав покрытий – а; нанотвердость и модуль упругости – б

Заключение. При исследовании микроструктуры замечено, что микроструктура становится более плотной при увеличении энергии частиц, осаждаемых на поверхность подложки. Выявлено, что содержание моноклинной и тетрагональной фазы напрямую влияет на нанотвердость и модуль упругости покрытия.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках конкурса FEWM-2024-0006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stevens R. Engineering properties of zirconia // Engineered Materials. Handbook, ASM International, Ceramics and Glasses. – 1991. – Vol. 4. – P. 775–786.
2. Электронно-лучевое осаждение покрытий из циркониевой керамики форвакуумным плазменным источником электронов / А.А. Андронов, Д.Б. Золотухин, А.Ю. Назаров и др. // Прикладная физика. – 2023. – № 5. – С. 91–96.

УДК 537.533.7

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ РАБОЧЕГО ГАЗА НА МИНИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ДИАМЕТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ ЕГО ФОКУСИРОВКЕ В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ

А.В. Долгова, аспирант каф. физики;

А.А. Зенин, доцент каф. физики, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, weatheraregood@gmail.com

Проведены экспериментальные исследования по измерению диаметра электронного пучка при его фокусировке в диапазоне давлений от 5 до 30 Па при фиксированном токе эмиссии 50 мА и последовательном увеличении ускоряющего напряжения от 8 до 19 кВ. Минимальное значение диаметра пучка, равное 1,4 мм, получено при давлении 30 Па и ускоряющем напряжении 8 кВ, а максимальное значение, равное 2 мм, получено при давлении 5 Па и ускоряющем напряжении 19 кВ.

Ключевые слова: измерение диаметра электронного пучка, фокусировка электронного пучка, форвакуумный источник электронов.

Электронно-лучевые технологии находят широкое применение в настоящее время. Одной из перспективных технологий является электронно-лучевая наплавка порошков [1, 2] – способ получения покрытий путем расплавления порошкового слоя узкофокусированным электронным пучком с высокой удельной плотностью мощности. Однако традиционный способ электронно-лучевой наплавки в вакууме

имеет ряд ограничений, связанных с возникновением поверхностного заряда на поверхности проводящих материалов [3]. Переход в форвакуумный диапазон давлений позволяет компенсировать поверхностный заряд за счет возникновения плотной плазмы в области прохождения электронного пучка.

Важной задачей для указанной технологии является достижение минимального диаметра электронного пучка. На значение диаметра электронного пучка оказывают влияние различные параметры, такие как геометрия фокусирующей системы, род и давление рабочего газа, ускоряющее напряжение, ток эмиссии и др.

Целью работы является определение влияния давления рабочего газа на минимальный диаметр электронного пучка при его фокусировке в форвакуумной области давлений.

Методика эксперимента. Эксперименты по измерению диаметра электронного пучка проводились на установке, схема которой показана на рис. 1. Форвакуумным насосом проводилась откачка остаточной амосферы в рабочей камере до максимально возможного давления, а затем в рабочую камеру напускался рабочий газ (гелий) для достижения необходимого для проведения эксперимента давления в рабочей камере.

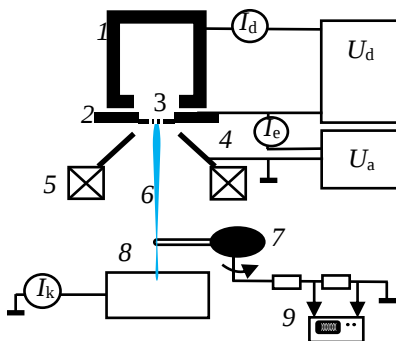


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – полый катод; 2 – анод; 3 – перфорированный электрод; 4 – экстрактор;
5 – фокусирующая система; 6 – электронный пучок; 7 – вращающийся двойной зонд; 8 – коллектор; 9 – осциллограф; U_d – источник питания разряда;

U_a – источник ускоряющего напряжения; I_d – сила тока разряда;

I_e – сила тока эмиссии; I_k – сила тока пучка, приходящего на коллектор

Разрядная система состоит из цилиндрического полого катода 1, плоского анода 2 с эмиссионным окном, в котором располагается перфорированный электрод 3, и конусовидного экстрактора 4. В экс-

периментах использовался перфорированный электрод с 1 основным эмиссионным отверстием диаметром 0,75 мм и 7 вспомогательными отверстиями.

Сформированный электронный пучок 6 фокусировался с помощью фокусирующей системы 5, представляющей собой цилиндрическую фокусирующую катушку с внешним диаметром 12 см, внутренним диаметром 8 см, высотой 5 см и сопротивлением 89 Ом.

Вращающийся двойной зонд 7 осуществляет сканирование электронного пучка, сигнал с зонда регистрируется осциллографом 9. По осциллограммам тока, протекающего через зонд, на полувысоте распределения определяется диаметр пучка.

Для определения влияния давления рабочего газа были проведены серии экспериментов по определению диаметра электронного пучка при фиксированном токе эмиссии 50 мА с увеличением ускоряющего напряжения от 8 до 19 кВ для различных значений давления рабочего газа в камере.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 приведена зависимость диаметра электронного пучка от ускоряющего напряжения при токе эмиссии 50 мА для различных значений давления газа в рабочей камере.

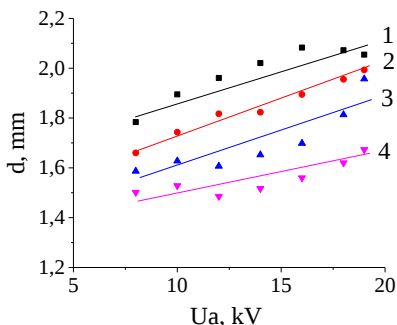


Рис. 2. Зависимость диаметра пучка от ускоряющего напряжения для различных значений давления газа в рабочей камере:
1 – 5 Па; 2 – 9 Па; 3 – 14 Па; 4 – 30 Па

Из рис. 2 видно, что наблюдается линейная зависимость диаметра электронного пучка от ускоряющего напряжения при всех рассмотренных значениях давления рабочего газа. Кроме того, с увеличением давления уменьшается как значение минимального диаметра пучка, так и угол наклона его зависимости от ускоряющего напряжения.

Закключение. В результате проведенного исследования определено, что при работе в диапазоне давлений от 5 до 30 Па успешно

может проводиться фокусировка электронного пучка в пятно диаметром от 1,4 до 2 мм при фиксированном токе эмиссии 50 мА.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10037, <https://rscf.ru/project/24-79-10037/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review // International Materials Reviews. – 2016. – Vol. 61, № 5. – P. 361–377.
2. Electron beam powder bed fusion of copper components: a review of mechanical properties and research opportunities / E. Sharabian, M. Leary, D. Fraser, S. Gulizia // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2022. – Vol. 122. – P. 513–532.
3. Powder smoking phenomenon in electron beam powder bed fusion: A comprehensive review of prediction, monitoring and mitigation methods / A.K. Mehta, G. Gote, G. Mittal, Y. Patil, K.P. Karunakaran // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 127. – P. 314–327.

УДК 544.541

ВЛИЯНИЕ ФЛЮЕНСА ЭЛЕКТРОНОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКА CaSiO_3 , МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ CeO_2

М.М. Михайлов, зав. лаб. РКМ, д.ф.-м.н.;

*Д.С. Федосов, аспирант каф. ФЭ; В.А. Горончко, с.н.с. лаб. РКМ,
к.т.н.; А.Н. Лапин, в.н.с. лаб. РКМ, к.т.н.; С.А. Юрьев, в.н.с.
лаб. РКМ, к.т.н.; С.П. Иваничко, аспирант каф. ФЭ*

г. Томск, ТУСУР, dmitrii.s.fedosov@tusur.ru

Изучено влияние модифицирования силиката кальция наночастицами диоксида церия на изменение коэффициента поглощения солнечного излучения (α_s). Для расчёта коэффициента поглощения использовались спектры диффузного отражения (ρ_λ). Эксперименты проводились в условиях вакуума с облучением образцов электронами в диапазоне флюенса $\Phi = (1-7) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при энергии 30 кэВ. Установлено, что при концентрации наночастиц диоксида церия 3 мас.% модифицированный микропорошок силиката кальция демонстрирует повышенную радиационную стойкость от 1,31 до 4,30 раза в зависимости от флюенса электронов. Модифицированный порошок можно использовать в качестве пигмента для терморегулирующих покрытий космических аппаратов класса «Оптические солнечные отражатели».

Ключевые слова: космические аппараты, терморегулирующие покрытия, радиационная стойкость, нанотехнологии, силикат кальция, диоксид церия.

Надежность работы космических аппаратов (КА) зависит от блоков и устройств, входящих в его конструкцию. К ключевым элементам, определяющим работоспособность КА, относятся системы энергоснабжения (солнечные батареи и устройства передачи энергии), системы связи (антенно-фидерные устройства), а также системы теплового регулирования, включающие радиаторы с терморегулирующими покрытиями, охлаждающие газы и средства их хранения и перекачки.

Поскольку при увеличении времени активного существования КА возрастают требования ко всем системам, в том числе и к системам терморегулирования: Терморегулирующие покрытия (ТРП) должны обладать повышенной фото- и радиационной стойкостью к действию облучения космического пространства. Одним из эффективных направлений и способов достижения этого требования является модифицирование наночастицами. Полученные к настоящему времени результаты на различных материалах с использованием наночастиц различных типов и классов, обладающих различными размерами и удельной поверхностью, показывают [1–3], что стойкость к облучению свойств и рабочих характеристик материалов может быть увеличена от десятков процентов до нескольких раз. При этом одной из перспективных технологий является использование в качестве модификаторов порошков оксидов металлов с катионами редкоземельных элементов (РЗЭ). Такие порошки способны уменьшать концентрацию образованных при облучении первичных дефектов за счет протекания двух процессов: релаксации на наночастицах, как на дефектах кристаллических структур малых размеров и релаксации на катионах РЗЭ с незаполненной внутренней *f*-оболочкой.

Целью настоящего исследования является анализ изменений коэффициента поглощения a_s как основной рабочей характеристики ТРП при облучении электронами исходного порошка $mCaSiO_3$ и модифицированного наночастицами $nCeO_2$.

В работе использован порошок микронных размеров ($mCaSiO_3$), изготовленный компанией ООО «Минерал» (Россия), а также наноразмерный порошок диоксида церия ($nCeO_2$), произведённый компанией China Rare Metal Material Co., LTD (Китай).

Методика модифицирования микропорошка $mCaSiO_3$ 3 мас.% наночастицами $nCeO_2$ схематично представлена на рис. 1.

Условия регистрации спектров диффузного отражения приведены в работе [4]. Интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения (a_s) рассчитанный по спектрам ρ_λ , в соответствии с международными стандартами [5, 6], равен 0,121 для исходного микропо-

рошка CaSiO_3 и 0,155 для модифицированного пигмента $\text{mCaSiO}_3 + 3 \text{ мас.}\% \text{ nCeO}_2$ соответственно.



Рис. 1. Методика получения модифицированного пигмента $\text{mCaSiO}_3 + 3 \text{ мас.}\% \text{ nCeO}_2$

На рис. 2 представлена зависимость изменения интегрального коэффициента поглощения (Δa_s) для исходного микропорошка mCaSiO_3 и порошка, модифицированного наночастицами nCeO_2 , от флюенса электронов с энергией 30 кэВ.

Изменения коэффициента поглощения Δa_s модифицированного наночастицами порошка значительно меньше по сравнению с немодифицированным порошком. Коэффициент эффективности модифицирования, определяемый как отношение величин Δa_s немодифицированного порошка Δa_{s0} к соответствующим значениям для модифицированного порошка Δa_{sm} составляет 4,33; 2,72; 2,03; 1,52 и 1,31 для флюенса электронов $(1, 2, 3, 5 \text{ и } 7) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ соответственно.

Выполненные исследования показали, что модифицирование порошка микронных размеров mCaSiO_3 наночастицами nCeO_2 приводит к повышению радиационной стойкости при облучении электронами с энергией 30 кэВ флюенсом $\Phi = (1 - 7) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Коэффициент эффективности, определённый на основе соотношения изменений интегрального коэффициента поглощения немодифицированного порошка к аналогичным изменениям модифицированного порошка после электронного облучения, варьирует в диапазоне от 1,31 до 4,33 в зависимости от величины флюенса электронов. Отсюда можно сделать вывод, что модифицирование микропорошка mCaSiO_3 наночастицами nCeO_2 может быть использовано для произ-

водства нового стойкого к действию ионизирующих излучений пигмента для терморегулирующих покрытий космических аппаратов класса «Оптические солнечные отражатели».

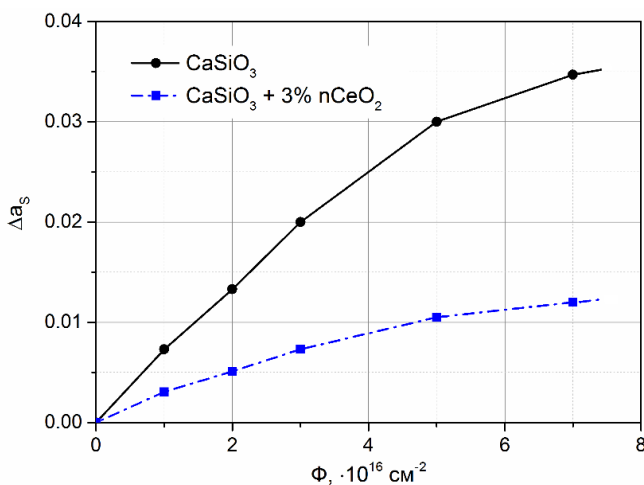


Рис. 2. Зависимость изменений интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения исходного микропорошка mCaSiO_3 и модифицированного 3 масс.% нано- nCeO_2 от флюенса электронов с энергией 30 кэВ

Исследование выполнено при финансовой поддержке госзадания № FEWM-2023-0012 Министерства науки и Высшего образования РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mikhailov M.M. The Optical Properties and Radiation Stability of Metal Oxide Powders Modified with Nanoparticles. – Cambridge, 2023. – 296 p.
2. Юрина В.Ю. Оптические свойства и радиационная стойкость полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 1.3.8. – Томск, 2022. – 141 с.
3. Нецименко В.В. Исследование структуры, свойств радиационной стойкости оксидных порошков, модифицированных наночастицами: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 1.3.8. – Томск, 2017. – 272 с.
4. Reflective thermal control coating for spacecraft based on ZnO pigment and Li_2SiO_3 silicate modified by SiO_2 nanoparticles / M.M. Mikhailov, S.A. Yuryev, A.N. Lapin, V.A. Goronchko // Ceramics International. – 2023. – Vol. 49, № 12. – C. 20817–20821.
5. ASTM E490 – 00a Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, 2019.
6. ASTM E903-20 Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres, 2020.

ОТКЛОНЕНИЕ СФОКУСИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПОВОРОТНОЙ МАГНИТНОЙ КАТУШКОЙ

Г.А. Касьянов, студент; А.С. Климов, проф. каф. физики;

И.Ю. Бакеев, доцент каф. физики; А.А. Лыман, студент

г. Томск, ТУСУР, gleb.kas.1990@mail.ru

Продemonстрировано изменение угла отклонения электронного пучка при изменении токов двух групп витков поворотной катушки. Для всех ускоряющих напряжений зависимости угла поворота электронного пучка от токов, подаваемых на группы витков поворотной катушки, не выявлено. Определены конфигурации токов групп витков, где наблюдается минимальное отклонение по обемам.

Ключевые слова: отклонение, электронный пучок, поворотная катушка.

В процессе форвакуумной электронно-лучевой обработки материалов происходит попадание частиц испаряемых веществ в разрядный промежуток плазменного источника, что приводит к сбою стабильного горения разряда. В качестве защиты используется поворот электронного пучка на значительный угол. Для поворота пучка используются как электростатическое, так и магнитные поля.

Отклонение в электростатическом поле осуществляется при прохождении пучка между двумя параллельными пластинами с потенциалом порядка киловольт. Основным недостатком метода в условиях форвакуума является зажигание тлеющего разряда между пластинами, который не будет оказывать влияния на электроны [1].

Электронный пучок отклоняют в продольном и поперечном магнитных полях. Влияние на движение электронов зависит от того, на какую компоненту скорости воздействует поле, радиальную или продольную. Главным недостатком отклонения в продольном поле является отклонение пучка на малый угол, так как воздействие идет на радиальную составляющую, имеющую значительно меньшее значение, чем продольная [2]. Основной недостаток отклонения пучка в поперечном поле заключается в сильном разбросе по энергиям электронов, вследствие чего наблюдается расфокусировка пучка [3].

Цель настоящей работы заключалась в расчете угла отклонения электронного пучка, прошедшего через изогнутую на 90° поворотную катушку с продольным магнитным полем, построенную по программе для моделирования физических процессов, в зависимости от тока катушки, не претерпевшего сильного расхождения.

Моделируемое устройство представляет четверть тороида из стали с намотанной на нее медной проволокой. Размеры: внутренний диаметр – 40 мм, внешний радиус – 57 мм, толщина стенок – 2 мм, количество витков проволоки – 850, диаметр проволоки – 0,5 мм. Модель предназначалась для расчета траектории пучка, испускаемого из источника с ускоряющим потенциалом 6, 8, 10 и 12 кВ.

Для настройки угла поворота пучка витки катушки были разделены на две равные группы, и ток подавался на них независимо.

Эксперимент состоял в варьировании токов, подаваемых на обе группы витков поворотной катушки с фиксированием угла отклонения электронного пучка по осям Ox и Oy для каждого ускоряющего напряжения. Ток, подаваемый на 1-ю группу витков поворотной катушки, изменялся от 3 до 5 А, ток второй группы изменялся в пределах до ± 3 А от тока первой группы. Ток для первой группы витков был выбран исходя из того, что при токе менее 3 А электронный пучок не выходил из поворотного устройства, так как поглощался внутри катушки, выше 5 А наблюдалась сильная расфокусировка пучка на выходе.

Результаты. В таблице представлена зависимость углов отклонения электронного пучка по осям Ox и Oy при различных токах, подаваемых на группы витков поворотной катушки и при различных ускоряющих напряжениях. Как видно из таблицы, не наблюдается закономерности в зависимости угла для любого тока первой группы витков и любого значения ускоряющего напряжения.

Углы отклонения для различных токов обеих групп витков поворотной катушки при различных ускоряющих напряжениях

Ток, А		Ускоряющее напряжение, кВ							
		6		8		10		12	
		Угол, град							
1-я гр.	2-я гр.	Ox	Oy	Ox	Oy	Ox	Oy	Ox	Oy
5	8	22	21	23	12	25	27	18	23
5	7	19	18	27	27	19	26	22	17
5	6	25	15	20	28	21	19	30	24
5	5	27	27	17	22	26	25	28	33
5	4	16	27	27	27	25	34	19	33
4	6	31	27	21	18	33	24	30	33
4	5	19	22	31	26	28	34	22	31
4	4	25	25	28	35	17	32	20	28
4	3	23	33	19	32	21	28	—	—
3	4	27	33	22	30	31	36	34	33
3	3	21	31	25	30	29	35	32	41
3	2	—	—	—	—	29	41	—	—

Для всех ускоряющих напряжений при определенной конфигурации токов на группах витков существует состояние, при котором наблюдается наименьшее отклонение по обеим осям:

– при 6 кВ и токе в первой группе 5 А и второй 7 А отклонение по оси Ox 19 град, по Oy – 19 град;

– при 8 кВ и токе в первой группе 5 А и второй 5 А отклонение по оси Ox 17 град, по Oy – 22 град;

– при 10 кВ и токе в первой группе 5 А и второй 6 А отклонение по оси Ox 21 град, по Oy – 19 град;

– при 12 кВ и токе в первой группе 5 А и второй 7 А отклонение по оси Ox 22 град, по Oy – 17 град.

Заключение. В рамках работы продемонстрировано изменение угла отклонения электронного пучка при изменении токов, подаваемых на две группы витков поворотной катушки. Определены конфигурации токов групп витков, где наблюдается минимальное отклонение по обеим осям в зависимости от ускоряющего напряжения.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках конкурса FEWM-2024-0006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schultz H. Electron Beam Welding. – C: Abington Publishing, 1993. – 240 p.
2. Рогинский Л.А. Динамика интенсивных электронных пучков в криволинейных транспортных каналах с продольным магнитным полем // Журнал технической физики. – 1985. – Т. 8, вып. 55. – С. 1506–1511.
3. О возможности прецизионной электронно-лучевой обработки протяженных диэлектрических изделий плазменным источником электронов в форвакууме / И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин, А.С. Климов, Е.М. Окс // Прикладная физика. – 2017. – Т. 3, № 5. – С. 26 – 30.

УДК 537.525

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ПРИ ОСАЖДЕНИИ НИЗКООМНЫХ ПЛЕНОК ИТО МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

*Ю.С. Жидик, в.н.с. ЛИОР каф. ФЭ ТУСУР, н.с. ИОА СО РАН,
к.т.н.; А.В. Москалев, студент каф. ФЭ
г. Томск, ТУСУР, iurii.s.zhidik@tusur.ru*

Приведены результаты исследования характеристик плазмы газового разряда при осаждении пленок ИТО магнетронным распылением. Электрофизические свойства ИТО в значительной степени определяются соотношением Ar / O_2 в рабочей газовой атмосфере. Пока-

зано, что ток магнетронного разряда, падение напряжения и спектр излучения плазмы газового разряда существенно зависят от изменения потока напускаемого кислорода. Установленный факт можно использовать для контроля корректности соотношения Ag / O_2 при осаждении ИТО.

Ключевые слова: ИТО, реактивное магнетронное распыление, спектр излучения плазмы магнетронного разряда.

ИТО является широко востребованным прозрачным проводящим материалом в производстве оптоэлектронных приборов и электронных устройств [1, 2]. Однако, несмотря на широкое применение пленок ИТО, процесс их осаждения остается сложной задачей, требующей тщательного контроля и оптимизации. Для указанных применений пленки ИТО наиболее часто синтезируют методом реактивного магнетронного распыления мишени из сплава индий-олово в атмосфере смеси газов Ag / O_2 . Причем электрофизические свойства осаждаемых пленок прежде всего определяет соотношение Ag / O_2 , которое можно контролировать по параметрам плазмы газового разряда [2].

Целью работы является исследование параметров плазмы газового разряда при осаждении пленок ИТО методом реактивного магнетронного распыления в условиях разного потока напускаемого кислорода.

При проведении исследований пленки ИТО осаждались методом реактивного магнетронного распыления мишени $\text{In} (90\%) / \text{Sn} (10\%)$ в атмосфере из смеси газов Ag / O_2 на установке EPOS-PVD по технологии, близкой к [3]. Газовый поток напуска Ag во время напыления составлял 2 л/ч и обеспечивал стабильный магнетронный разряд в диапазоне давлений $(4-6) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Газовый поток напуска O_2 во время исследований варьировался в диапазоне от 0 до 1 л/ч. Температура подложек составляла 300 °С. Мощность разряда поддерживалась постоянной и составляла 40 Вт.

На рис. 1 приведены зависимости изменения тока и падения напряжения в плазме газового разряда при изменении газового потока напуска кислорода.

Значительное снижение тока газового разряда и, соответственно, увеличение падения напряжения в разрядном промежутке наблюдается при увеличении потока напуска кислорода в рабочую камеру до 0,6 л/ч. Это обусловлено переходом работы магнетрона в оксидном режиме, связанным с окислением поверхности распыляемой мишени. Экспериментально было подтверждено, что именно при газовом потоке напуска кислорода 0,6 л/ч осаждаемые пленки ИТО имеют наименьшее удельное сопротивление и высокую оптическую прозрачность.

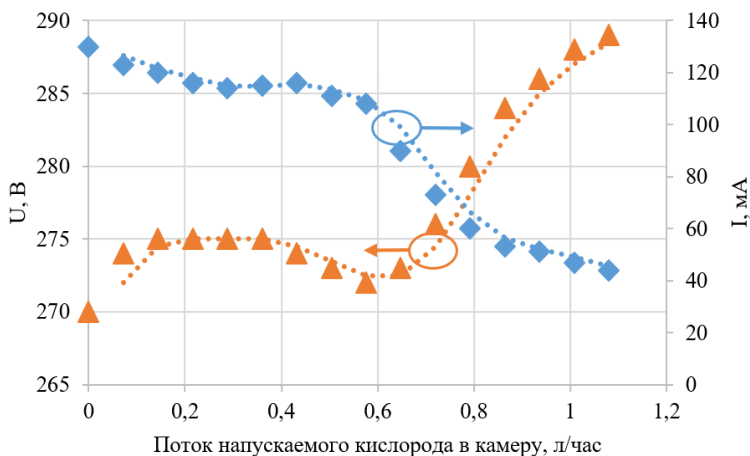


Рис. 1. Зависимости изменения тока и падения напряжения в плазме газового разряда при изменении газового потока напуска кислорода

Эмиссионные спектры плазмы, полученные в ходе распыления мишени при разных потоках напускаемого кислорода, приведены на рис. 2.

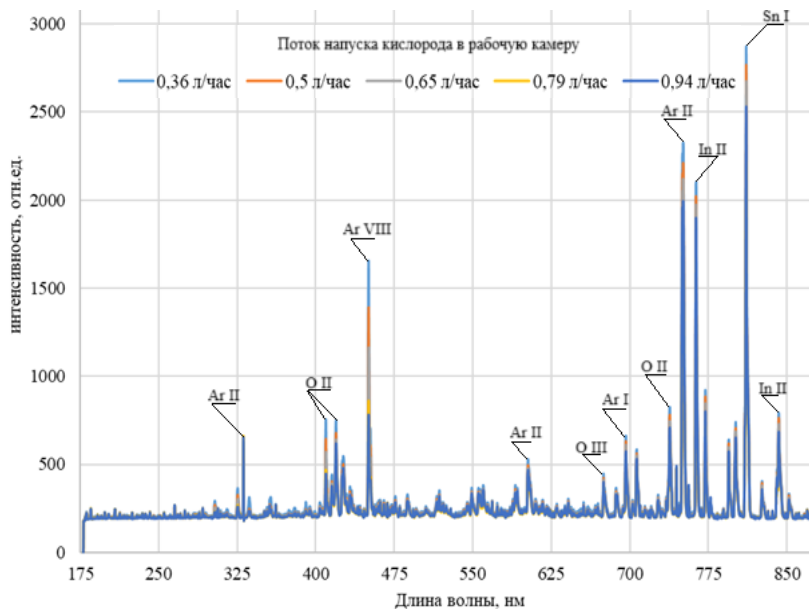


Рис. 2. Эмиссионные спектры плазмы при осаждении ИТО для разных потоков напуска кислорода

Расшифровка эмиссионных линий излучения плазмы газового разряда осуществлялась по базе данных «Atomic Spectra Database» [4].

Полученные эмиссионные спектры плазмы магнетронного разряда также отражают зависимость изменения интенсивности спектральных линий излучения при изменении потока напускаемого кислорода. Интенсивность спектральных линий излучения пропорционально снижается при изменении потока напускаемого кислорода и может быть использована для отслеживания корректности состава рабочей газовой атмосферы при осаждении пленок ИТО.

Таким образом, проведенные исследования показали, что характеристики плазмы газового разряда можно использовать для контроля корректности соотношения Ag / O_2 в смеси газовой атмосферы, что является важным условием при осаждении низкоомных пленок ИТО.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семикина Т.В. Оксидная электроника как одно из направлений прозрачной электроники / Т.В. Семикина, В.Н. Комащенко, Л.Н. Шмырева // Электроника и связь. – 2010. – № 3. – С. 20–28.
2. Троян П.Е. Прозрачные электропроводящие покрытия с контролируемыми значениями коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления / П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров, Ю.С. Жидик // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 1 (31). – С. 99–102.
3. Zhidik Y. Nanoscale ITO Films for Plasmon Resonance-Based Optical Sensors / Y. Zhidik, A. Ivanova, S. Smirnov, K. Zhuk, I. Yunusov, P. Troyan // Coatings. – 2022. – № 12 (12). – P. 1868.
4. Atomic Spectra Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>, свободный (дата обращения: 16.03.2025).

УДК 537.533.9

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ

А.В. Казаков, с.н.с., к.т.н.; Н.А. Панченко, доцент, к.ф.-м.н.;

А.Е. Петров, аспирант

г. Томск, ТУСУР, каф. физики, a.e.petrov_job@mail.ru

При облучении импульсным электронным пучком в форвакууме варьирование энергией пучка в импульсе позволяет изменять шеро-

ховатость поверхности керамики из диоксида циркония, стабилизированного Y_2O_3 .

Ключевые слова: циркониевая керамика, импульсный электронный пучок, модификация поверхности.

Керамика из диоксида циркония широко используется в различных отраслях промышленности благодаря своим свойствам, таким как, например, высокая термическая стойкость, которая позволяет применять керамику для термостойких покрытий [1], высокая биоинертность и биосовместимость, что дает возможность использовать ее для протезирования в стоматологии [2]. Для получения или улучшения свойств поверхности керамики, представляющих интерес для практического применения, используют поверхностную обработку, например, потоками ускоренных ионов (ионными пучками) [3] и высокоэнергетичных (> 100 кэВ) электронов (электронными пучками) [4]. Обработка низкоэнергетичными (до десятков кэВ) электронными пучками при низких давлениях приводит к образованию слоя отрицательного заряда на керамической поверхности, что снижает эффективность обработки. Данная проблема может быть решена с помощью форвакуумных плазменных источников электронов, которые работают при давлениях до 30 Па, что обеспечивает полную или частичную нейтрализацию зарядки поверхности непроводящих материалов [6].

В настоящей работе показаны результаты исследования по влиянию обработки импульсным электронным пучком в форвакуумной области давлений на поверхности керамики из диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия.

Методика проведения эксперимента. Дискообразные образцы (диаметр 10 мм, толщина 3 мм), выполненные из диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия Y_2O_3 (содержание – 5,15%), размещались в вакуумной камере в тиглях, которые были закреплены на системе перемещения, что позволяло обрабатывать несколько образцов за один цикл откачки (рис. 1). Блок питания и управления обеспечивал регулировку параметров плазменного источника электронов (описание источника представлено в [6]), который генерировал электронный пучок большого радиуса. Обработка пучком осуществлялась при давлении газа (гелий) в вакуумной камере $p = 8$ Па, энергии электронов 8 кэВ и постоянной мощности пучка в импульсе 350 кВт/имп., а энергия пучка в импульсе E_p изменялась длительностью импульса. Диаметр пучка в области размещения образцов составлял 20 мм. Каждый образец облучался 3 импульсами. Характеристики поверхности образцов исследовались с помощью бесконтактного оптического профилометра 3D-SuperView W1.

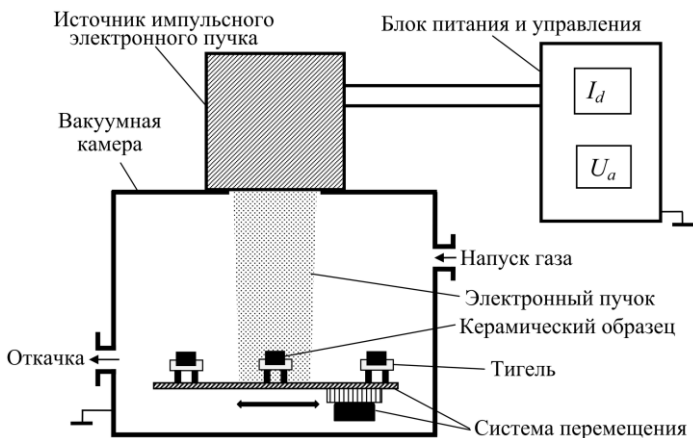
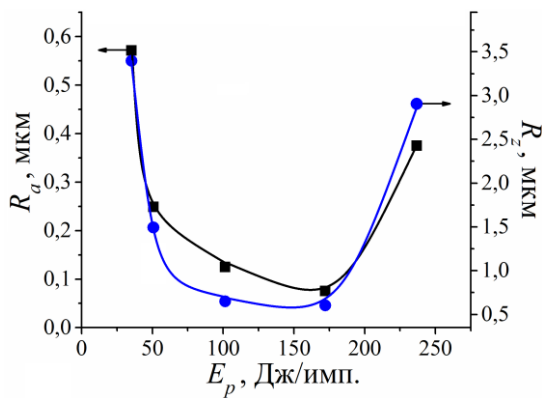


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

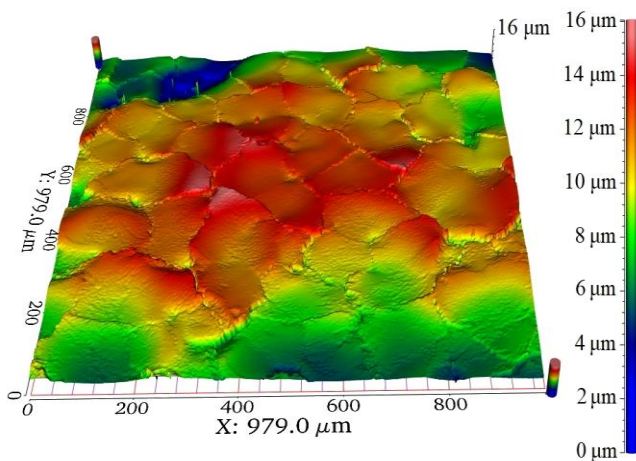
Результаты экспериментов. На рис. 2, *а* представлен график зависимости параметров шероховатости R_a и R_z от энергии пучка в импульсе E_p . При заданной мощности электронного пучка в импульсе увеличение энергии в импульсе обеспечивает уменьшение R_a и R_z , т.е. уменьшение шероховатости поверхности при E_p около 175 Дж/имп. При E_p более 175 Дж/имп. воздействие пучка приводит к увеличению параметров R_a и R_z , т.е. увеличению шероховатости поверхности.

Анализ морфологии по 3D-изображениям поверхности керамики показал, что это связано с формированием «чешуйчатой» структуры на поверхности образцов (рис. 2, *б*).



а

Рис. 2 (начало)



б

Рис. 2 (окончание). Зависимость параметров шероховатости R_a и R_z от энергии пучка в импульсе E_p (а); структура поверхности керамики при $E_p = 237$ Дж/имп. (б)

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках конкурса FEWM-2024-0006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Overview on advanced thermal barrier coatings / R. Vaßen, M.O. Jarligo, T. Steinke, D.E. Mack, D. Stöver // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205, No. 4. – P. 938–942.
2. A review of zirconia as a dental restorative material / N.F. Amat, A. Muchtar, N. Yahaya, M.J. Ghazali // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. – 2012. – Vol. 6, No. 12. – P. 9–13.
3. Гынгазов С.А. Модификация структуры и механических свойств оксидной керамики ионной обработкой / С.А. Гынгазов, В.А. Болтуева // *Вестник Сибирского гос. индустр. ун-та*. – 2023. – № 2. – С. 28–39.
4. Properties of zirconium dioxide ceramics irradiated with high doses of pulsed electron beam / S. Nikiforov et al. // *Thermoluminescent and Dosimetric. Crystals*. – 2023. – Vol. 13. – Art. No. 1585.
5. Electron beam treatment of non-conducting materials by a fore-pump-pressure plasma-cathode electron beam source / V.A. Burdovitsin, A.S. Klimov, A.V. Medovnik, E.M. Oks // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2010. – Vol. 19, No. 5. – Art. No. 055003.
6. Broad-beam plasma-cathode electron beam source based on a cathodic arc for beam generation over a wide pulse-width range / A.V. Kazakov, A.V. Medovnik, E.M. Oks, N.A. Panchenko // *Review of Scientific Instruments*. – 2020. – Vol. 91. – Art. No. 093304.

УМЕНЬШЕНИЕ ДЛИНЫ ЗАТВОРА ЗА СЧЕТ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИСТЕНОЧНОГО ДИЭЛЕКТРИКА НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ GaN-HEMT

*А.Е. Шестериков, Д.А. Шестерикова, студенты каф. ФЭ
Научный руководитель П.Е. Троян, проф., д.т.н., зав. каф. ФЭ
г. Томск, ТУСУР, shesterikov.a.e@mail.ru*

Представлены результаты исследования возможности уменьшения длины затвора транзистора за счет формирования пристеночного диэлектрика на основе нитрида кремния для массового производства GaN-СВЧ МИС без использования электронно-лучевой литографии. Было исследовано влияние толщины второго слоя Si_3N_4 , а также времени травления данного слоя на уменьшение размера затвора GaN-HEMT.

Ключевые слова: Si_3N_4 , GaN, HEMT, пристеночный диэлектрик, длина затвора.

Технология GaN-HEMT может применяться в высокочастотных усилителях мощности и рассматривается различными производителями как одна из ключевых технологий изготовления СВЧ- и силовых полупроводниковых приборов [1–3].

В массовом производстве GaN-монолитных интегральных схем (МИС) самой сложной и времязатратной операцией является формирование Т-образного затвора. При размере затвора менее 0,5 мкм стандартная контактная оптическая литография не позволяет обеспечить требуемую разрешающую способность при формировании окон в маске фоторезиста. В связи с этим большинство производителей используют электронно-лучевую литографию (ЭЛЛ) для прорисовки затворов менее 0,5 мкм [4]. В результате увеличивается время, затрачиваемое на производство СВЧ МИС, а как следствие и их стоимость.

Целью данной работы является исследование возможности уменьшения длины затвора транзистора за счет формирования пристеночного диэлектрика на основе нитрида кремния для массового производства GaN-СВЧ МИС без использования электронно-лучевой литографии.

Методика эксперимента. На первом этапе технологического процесса на подложку наносится слой диэлектрика Si_3N_4 толщиной 100 нм на установке PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition). В данном слое формируется окно длиной L_0 методом контактной фотолитографии с последующим анизотропным реактивным ионным травлением (РИТ) в ICP-реакторе. Затем на полученную структуру конформно осаждается второй слой Si_3N_4 толщиной h_2 в

установке PECVD. После этого проводится анизотропное реактивное ионное травление по всей площади пластины до первого слоя Si_3N_4 . В результате за счет большей толщины диэлектрика в боковых областях исходного окна образуются дополнительные области пристеночного диэлектрика из нитрида кремния, что позволяет уменьшить эффективную длину затвора транзистора без использования электронно-лучевой литографии. На рис. 1 представлена схема, поясняющая принцип уменьшения длины затвора за счет формирования пристеночного диэлектрика, а также схема разделения подложки на образцы.

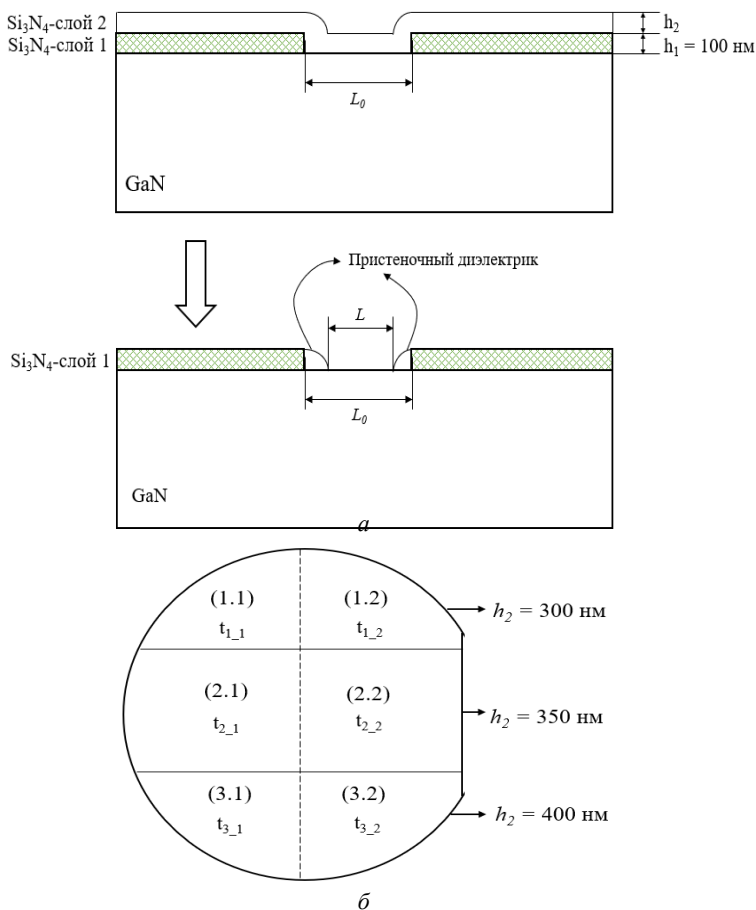


Рис. 1. Принцип уменьшения длины затвора за счет формирования пристеночного диэлектрика (а) и схема разделения подложки на образцы (б)

Результаты и их анализ. На рис. 2 представлены карта распределения толщины первого слоя Si_3N_4 по поверхности пластины после осаждения на установке PECVD, а также результаты измерения длины затворов после травления окна через фоторезистивную маску.

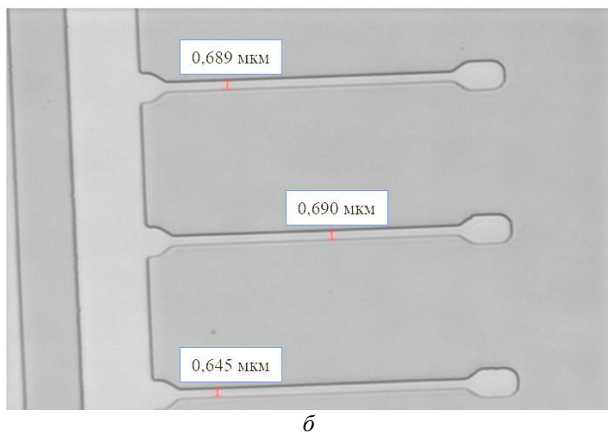


Рис. 2. Карта распределения толщины первого слоя Si_3N_4 по поверхности пластины (а) и результаты измерения длины затворов (б)

Из полученных данных среднее значение длины окна в маске после травления первого слоя Si_3N_4 составило 0,67 мкм. В таблице представлены результаты осаждения и травления второго слоя Si_3N_4 .

Результаты осаждения и травления второго слоя Si_3N_4				
№	Требуемая h_2 , нм	Реальная h_2 , нм	Процент перетрав	$t_{\text{тр}}$, с
(1.1)	300	283,5	0	193
(1.2)			10	212
(2.1)	350	347,9	0	237
(2.2)			10	261
(3.1)	400	388,9	0	265
(3.2)			10	292

Для измерения результирующей длины затвора после осаждения и травления второго диэлектрического слоя для каждого из образцов были изготовлены сколы и произведено измерение размеров методом сканирующей электронной микроскопии на установке Raith150. Абсолютная погрешность при проведении измерений составляла $\Delta = 10$ нм. На рис. 3 представлена зависимость длины затвора после осаждения и травления второго слоя Si_3N_4 от толщины данного слоя и времени травления.

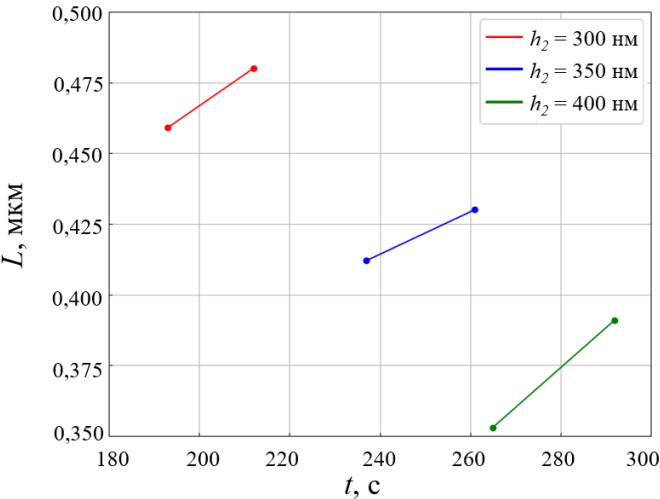


Рис. 3. Зависимость длины затвора после осаждения и травления второго слоя Si_3N_4 от толщины данного слоя и времени травления

Из зависимости на рис. 3 видно, что с увеличением толщины второго слоя Si_3N_4 уменьшается длина затвора GaN-HEMT, что говорит о

возможности использования данного метода в технологии массового производства МИС без использования электронно-лучевой литографии. Также с ростом времени травления второго диэлектрического слоя результирующая длина затвора транзистора увеличивается из-за растравливания пристеночного диэлектрика. По этой причине важно подбирать минимальное время травления, требуемое для открытия окон под затворы по всей полупроводниковой пластине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Iucolano F. GaN-on-Si HEMTs for wireless base stations / F. Iucolano, T. Boles // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2019. – Vol. 98. – P. 100–105.
2. Cho Y. et al. Linear Doherty power amplifier with an enhanced back-off efficiency mode for handset applications // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2014. – Vol. 62, № 3. – P. 567–578.
3. A Madero-Ayora M.J. et al. Linearization and EVM enhancement of an efficient class J amplifier for 3G and 4G mobile communication signals // *2012 Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits*. – IEEE, 2012. – P. 1–3.
4. Sun B. et al. Single step electron-beam lithography archiving lift-off for T-gate in high electron mobility transistor fabrication // *Microelectronic Engineering*. – 2020. – Vol. 229. – P. 111337.

УДК 621.315.5

ПЕРСПЕКТИВЫ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ GaN

А.А. Шупенёв, А.А. Есипов, аспиранты каф. ФЭ

Научный руководитель И.В. Кулинич, м.н.с. ЛИКС, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, Esipand@yandex.ru

Рассматриваются современные тенденции и перспективы развития транзисторов на основе нитрида галлия (GaN) в силовой электронике. Анализируются прогнозы Международной дорожной карты полупроводниковых технологий (IRDS, 2023), тенденции мирового рынка и технологические достижения в области GaN-транзисторов. Отмечаются преимущества GaN-транзисторов, такие как высокая подвижность носителей заряда, высокая эффективность и низкие потери при переключениях, а также обозначаются технологические вызовы, включая термическое управление и интеграцию с CMOS-технологиями. Приведены данные о росте рынка GaN-устройств, подтверждающие коммерческую актуальность данной технологии.

Ключевые слова: GaN, силовая электроника, материалы III–V группы, IRDS.

В последние годы электроника сталкивается с повышенными требованиями к эффективности, надёжности и миниатюризации устройств. В условиях постоянно растущих требований рынка и жесткой конкуренции традиционные кремниевые транзисторы постепенно уступают место новым решениям на основе широкозонных материалов, среди которых особое место занимают транзисторы на основе нитрида галлия (GaN).

Анализ и тенденции развития. Согласно Международной дорожной карте полупроводниковых технологий (IRDS 2023), особое внимание уделяется материалам канала с высокой подвижностью носителей заряда. Прогнозируется более активное внедрение таких материалов, как кремний-германий (SiGe), а затем и материалов III–V группы, таких как GaN и GaAs. Эти материалы обеспечивают более высокую подвижность носителей заряда, что необходимо для дальнейшего повышения скорости работы транзисторов и снижения энергетических потерь [1].

Технология нитрида галлия (GaN) демонстрирует стремительный рост и признание в сфере силовой электроники, благодаря широкозонной структуре материала (ширина запрещённой зоны составляет около 3,4 эВ), обеспечивающей высокую напряженность электрического поля и высокую подвижность электронов ($2000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) [2].

GaN-транзисторы не имеют лавинного пробоя, поскольку устройство разрушается при превышении пороговых значений напряжения. Поэтому они проектируются с большими запасами по напряжению пробоя (обычно на 30% выше номинала). Недавние достижения, такие как производство GaN-чипов на 300-миллиметровых подложках, позволяют значительно снизить себестоимость и расширить применение этой технологии [3, 4].

Отдельного внимания заслуживает развитие вертикальных GaN-транзисторов, которые способны выдерживать значительно более высокие напряжения (до нескольких тысяч вольт), сохраняя при этом компактные размеры и эффективный теплоотвод. Данная технология открывает новые перспективы для применения GaN в силовых преобразователях и устройствах электроснабжения [6].

Представленные прогнозы подтверждаются реальными показателями рынка GaN-транзисторов, который, по оценкам Infineon Technologies (2024), будет расти высокими темпами, увеличившись с 0,4 млрд USD в 2024 г. до 1,2 млрд USD к 2027 г.

Основными драйверами этого роста являются потребительский и автомобильный сегменты, что подчёркивает растущий спрос на эффективные преобразовательные системы в этих отраслях. А также

встраиваемые GaN-компоненты (например, монолитные полумосты и ePower Stage) становятся все более распространёнными и позволяют создавать эффективные системы, особенно в области потребительской электроники и автомобильной промышленности, включая двунаправленные преобразователи 48 В для гибридных автомобилей.

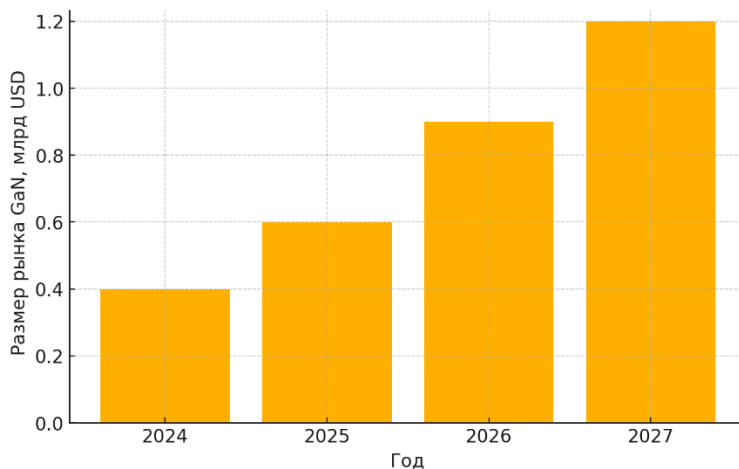


Рис. 1. Прогноз роста мирового рынка GaN-транзисторов [5]

Сложности, которые сегодня стоят перед разработчиками GaN-устройств, включают проблемы термического управления, снижение паразитных ёмкостей и интеграцию GaN-технологий с традиционными кремниевыми технологиями (например, CMOS). Эти задачи активно решаются в рамках международных программ и партнерств, таких как европейская инициатива UltimateGaN [6].

Заключение. Таким образом, силовые GaN-транзисторы являются важной технологической основой для повышения производительности, энергоэффективности и компактности устройств следующего поколения. Перспективы использования GaN-технологий подтверждаются как технологическими прогнозами дорожной карты IRDS, так и рыночными тенденциями на ближайшие годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Международная дорожная карта полупроводниковых технологий (IRDS 2023) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://irds.ieee.org/editions/2023>, свободный (дата обращения: 10.03.2025).
2. Макушкин М. Мощные SiC- И GaN-приборы: перспективы развития // Electronics: science, technology, Business. – 2020. – Vol. 199. – P. 46–58. DOI: 10.22184/1992-4178.2020.199.8.46.58.

3. Лукашин В.М. GaN-полевой транзистор с эффективным теплоотводом на Si-подложке / В.М. Лукашин, А.Б/ Пашковский, И.В. Пашковская // Письма в журнал технической физики. – 2023. – Vol. 49. – Р. 10. DOI: 10.21883/PJTF.2023.02.54278.19327.

4. Infineon Technologies AG [Электронный ресурс]. – <https://www.reuters.com/technology/infineon-targets-large-share-gan-chip-market-after-breakthrough-2024-09-11/>, свободный (дата обращения: 10.03.2025).

5. Анализ размера и доли рынка полупроводниковых устройств GaN – тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/gan-semiconductor-devices-market>, свободный (дата обращения: 10.03.2025).

6. UltimateGaN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ultimategan.eu/work-plan>, свободный (дата обращения: 10.03.2025).

УДК 621.315.5

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБОВ ОТВОДА ТЕПЛА ОТ КАНАЛА ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Т.А. Акулинин, А.А. Есипов, А. Шупенёв, аспиранты каф. ФЭ

Научный руководитель И.В. Кулинич, м.н.с. ЛИКС, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, artemteras@gmail.com

Проведены исследование и оптимизация способов отвода тепла от канала транзистора для снижения температуры полупроводниковых структур. Рассмотрены материалы пассивации с различной теплопроводностью, проведены численное моделирование и эксперименты. Показано, что применение диоксида циркония позволяет снизить температуру в транзисторе на 2–6 градусов по сравнению с традиционными материалами, что повышает надёжность устройств.

Ключевые слова: охлаждение, теплоотвод, оксид циркония, системы охлаждения, материалы пассивации.

Транзисторы AlGaIn/GaN широко применяются в силовой электронике благодаря высокой теплопроводности SiC-подложек [1]. Однако в устройствах GaN-on-Si из-за меньшей теплопроводности подложек проблема теплоотвода обостряется. Высокие плотности мощности (до 30 Вт/мм) в современных транзисторах приводят к значительному локальному нагреву, что влияет на стабильность и срок службы устройств [2]. Для решения этой проблемы применяются материалы пассивации с высокой теплопроводностью, способствующие эффективному отводу тепла. Одним из перспективных материалов является диоксид циркония (ZrO₂), обладающий высокой теплопроводностью и стойкостью к пробую [3, 4].

Описание модели. Для исследования был использован GaN-транзистор в корпусе QFN с теплоотводящим основанием. В структуру модели вошли теплоотводящие стержни из золота и различные материалы пассивации: Si_3N_4 ($\epsilon = 7$), ZrO_2 ($\epsilon = 30$) [4]. Мощность схемы составляла 1 Вт, температура окружающей среды – 50 °С. Конструкция с теплоотводящими стержнями позволила улучшить распределение тепла в структуре. Конструкция стержней представлена на рис. 1.

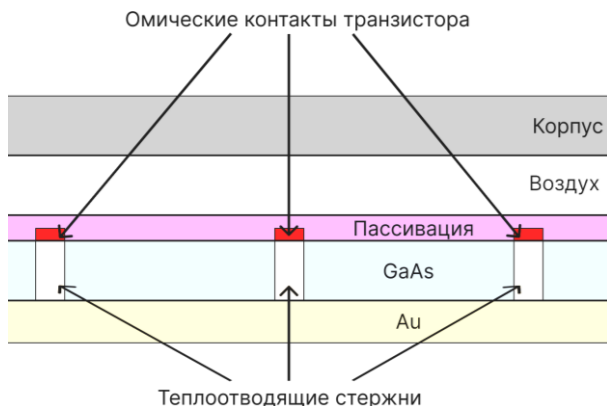


Рис. 1. Схематическое изображение структуры СВЧ ИМС

Исследование модели. На основе исследуемой структуры GaN-транзистора и выбранных условий расчета была построена модель в САПР COMSOL Multiphysics 6.1 (рис. 2).

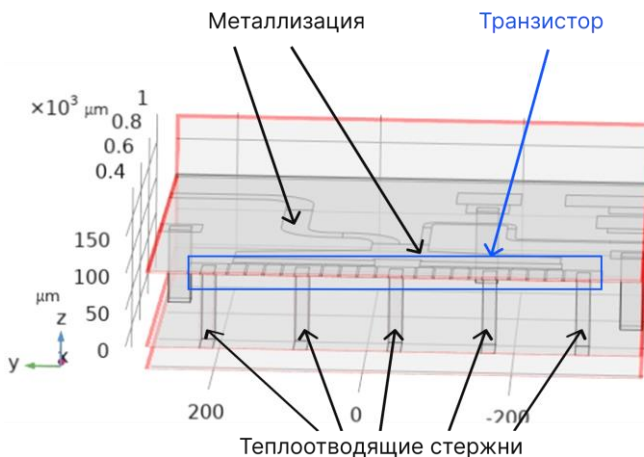


Рис. 2. Изображение структуры исследуемой модели

На рис. 3 представлен результат моделирования распределения тепла в кристалле GaN-СВЧ МИС с пассивирующим слоем на основе плёнки ZrO_2 .

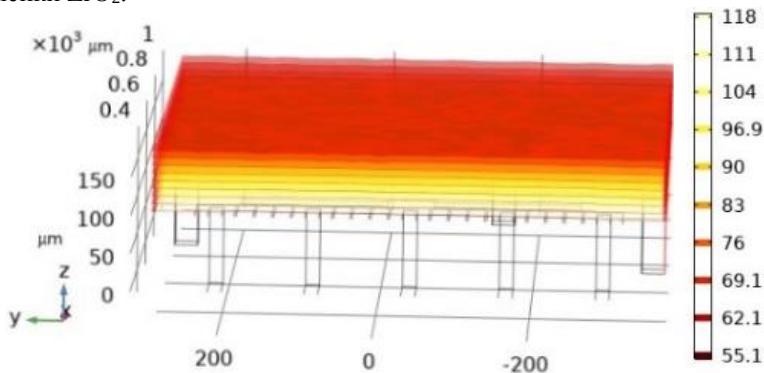


Рис. 3. Изображение с послойным распределением температуры, полученной в результате моделирования со слоем ZrO_2

Таким образом, максимальная температура транзистора с пассивирующим слоем из оксида циркония составляет 118°C .

На основе разработанной модели, аналогично было проведено исследование влияния различных диэлектрических пленок на температуру в кристалле для GaN МИС.

При использовании Si_3N_4 в качестве материала пассивации GaN МИС максимальная температура в канале составляет 121°C .

Применение более теплопроводящего диэлектрического материала позволяет снизить максимальную температуру канала на 2°C в сравнении с использованием стандартного диэлектрического материала.

Заключение. В данной статье было проведено исследование с использованием численного моделирования в среде COMSOL Multiphysics, чтобы изучить, как материалы для пассивации влияют на отвод тепла от полупроводниковых ИМС.

Диоксид циркония оказался самым эффективным материалом для пассивации с точки зрения отвода тепла. Его температура составила 118° , что позволяет эффективно контролировать тепловыделение в полупроводниковых ИМС.

Нитрид кремния также обеспечивает хороший отвод тепла, но его температура составила 121° . По сравнению с диоксидом циркония нитрид кремния немного уступает в показателях отвода тепла.

Таким образом, исследование позволило выявить диоксид циркония как наиболее эффективный материал для пассивации, обеспечивающий оптимальный отвод тепла от полупроводниковых ИМС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Liang Zhou, Zheng Wei San, Yu-Jie Hua, Liang Lin Investigation on Failure Mechanisms of GaN HEMT Caused by High-Power Microwave (HPM) Pulses 0018-9375 © 2016 IEEE
2. Simulations of diamond heat spreader for the thermal management of GaN-HEMT / Shirui Pua, Wenbo Luob, Yao Shuaic, Chuangui Wud, Wanli Zhanghe // 5th International Conference on Measurement, Instrumentation and Automation. – 2016.
3. Shur M.S. GaN based transistors for high power applications // Solid State Electron. – 1998. – Vol. 42, No. 12. – P. 2131–2138.
4. Hang Zhang Near-junction cooling of gan hemt by capped diamond heat spreader and embedded microchannels. – New Brunswick, New Jersey October, 2022.
5. 30-W/mm GaN-HEMTs by field plate optimization / Y.-F. Wu, A. Saxler, M. Moore, R.P. Smith, S. Sheppard, P.M. Chavarkar, T. Wisleder, U.K. Mishra, P. Parikh // IEEE Electron Device Lett. – Mar. 2004. – Vol. 25. – P. 117–119.

УДК 537.563

КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ ИСПАРЕНИЕМ КАРБИДА КРЕМНИЯ В РАЗНЫХ ГАЗАХ

Ф.А. Суховольский, студент каф. ЭП;

Л.Ж. Нгон А Кики, аспирант каф. физики

г. Томск, ТУСУР, spectrumz12@yandex.ru

Научный руководитель В.А. Бурдовицин, проф. каф. физики, д.т.н.

Представлены результаты измерения свойств кремний-углеродных пленок, осажденных электронно-лучевым испарением мишени, спеченной из порошка карбида кремния. Формирование пучка производилось форвакуумным плазменным электронным источником в различных газах: гелий, азот, пропан. У осажденных пленок измерялись оптические и механические свойства, а также состав.

Ключевые слова: электронный источник, электронный пучок, испарение карбида кремния, осаждение покрытий.

Одна из проблем, возникающих при осаждении кремний-углеродных пленок электронно-лучевым испарением карбида кремния, заключается в отличии элементного состава пленок от исходного материала [1]. Цель настоящей работы заключалась в комплексном исследовании соотношения между составом и свойствами кремний-углеродных пленок, а также условиями осаждения. Эксперимент проводился на установке, схематично изображенной на рис. 1. В [1] электроны, эмитируемые газоразрядной плазмой, формировались в пучок

ускоряющим напряжением U_a , а также магнитным полем линзы 2. Электронный пучок 3 разогревал карбид кремния 4, находящийся в графитовом тигле 5. Продукты испарения осаждались на подложках, размещенных в трех подогреваемых держателях 6. Температура подложек контролировалась термопарами 7. Рабочий газ напускался в камеру 8. Испарение проводилось в трех газах: гелий, азот и пропан. В качестве подложек использовались стекло, кварц, кремний и кристаллическая соль NaCl. На осажденных пленках производились измерения спектров пропускания в видимом и ближнем УФ-диапазонах, а также твердости с применением микротвердомера ПМТ-3 и состава с использованием растрового электронного микроскопа TM-1000 с приставкой EDS-SWIFT.

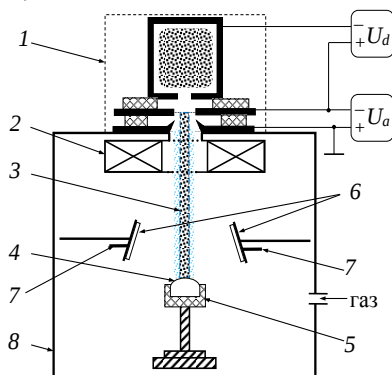


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Результаты эксперимента. Измерения спектров пропускания в видимом диапазоне позволили оценить ширину E_g оптической щели и ее зависимости от температуры осаждения (рис. 2).

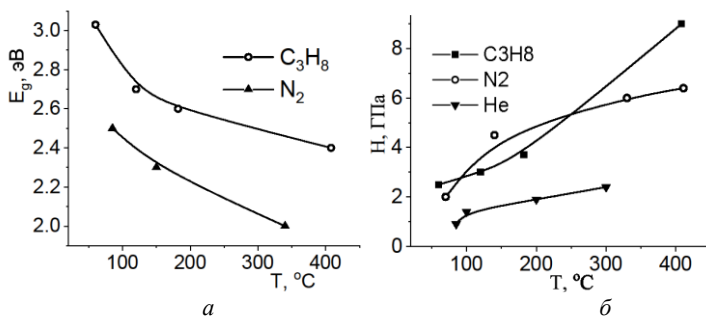


Рис. 2. Ширина E_g оптической щели (а) и твердость H (б) пленок как функция температуры T осаждения

Как можно заметить, во всех газах наблюдается одинаковая тенденция снижения E_g (а) и повышения твердости H (б) с ростом температуры осаждения. Причем наибольшая твердость достигнута при осаждении в пропане. В составе пленок присутствует кислород, содержание которого слабо изменяется с температурой осаждения. Соотношение кремния и углерода Si/C изменяется одинаково в разных газах, а именно Si/C растет с температурой осаждения. Причем в азоте пленка обогащена кремнием, а в пропане – углеродом.

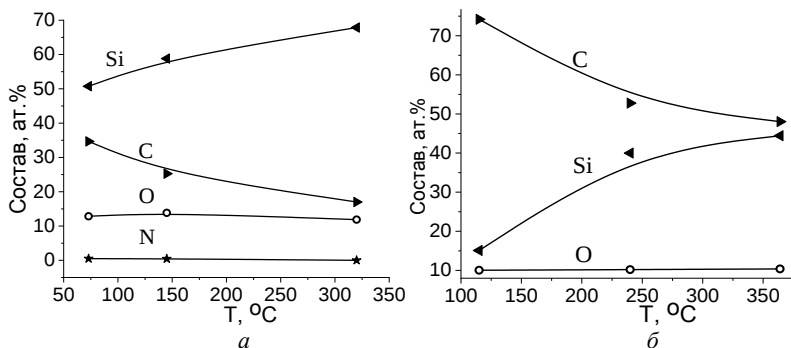
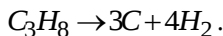


Рис. 3. Состав пленок, осажденных в гелии (а) и пропане (б), как функция температуры T осаждения

Объяснение установленным зависимостям может быть дано на основе представлений об уплотнении структуры пленки при повышении температуры. Это, в первую очередь, относится к повышению твердости. Снижение величины E_g коррелирует с возрастанием доли кремния, в связи с чем есть основания признать этот факт в качестве причины. Избыток углерода в пленках, осажденных в пропане, понятен, поскольку пропан может разлагаться как под непосредственным воздействием электронного пучка, так и в пучковой плазме как результат реакции [2]



Высаживающийся на поверхность растущей пленки углерод создает его избыток. По мере повышения температуры подложки происходит, скорее всего, интенсификация окисления углерода с образованием летучей фазы, что и приводит к снижению содержания углерода.

Выполненные эксперименты указывают на возможность осаждения кремний-углеродных покрытий удовлетворительного качества электронно-лучевым испарением карбида кремния при условии контроля газовой среды.

Работа выполнена за счет гранта РФФИ № 24-29-00392.

ЛИТЕРАТУРА

1. Electrical and optical properties of amorphous silicon carbide thin films prepared by e-beam evaporation at room temperature / J. Zheng, L. Ye, M. He, D. He, Y. Huang, J. Yu, T. Chen /// Journal of Non-Crystalline Solids. – 2022. – Vol. 576. – P. 121233.
2. Plasma-assisted decomposition of gaseous propane to produce CO_x free hydrogen / I. Aleknaviciute, T.G. Karayiannis, M.V. Kollins, C. Xanthos // International Journal of Low Carbon Technologies. – 2013. – Vol. 8. – P. 197–202.

УДК 537.533

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ФОРВАКУУМНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ НА ОСНОВЕ КОНТРАГИРОВАННОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА

А.В. Казаков, с.н.с. каф. физики, к.т.н.;

Н.А. Панченко, доцент каф. физики, к.ф.-м.н.;

А.С. Попова, студентка каф. ЭП; А.В. Тюньков, в.н.с.

лаб. плазменной электроники каф. физики, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, popovaalena700@gmail.com

Показано, что при генерации импульсного пучка электронов форвакуумным плазменным источником электронов на основе контрагированного дугового разряда увеличение давления газа приводит к изменению распределения плотности тока по сечению пучка.

Ключевые слова: импульсный электронный пучок, плазменный источник электронов, форвакуумный диапазон давлений, контрагированный дуговой разряд.

При давлениях 10^{-4} – 10^{-1} Па источники широкоапертурных импульсных электронных пучков с плазменными катодами используются преимущественно для поверхностной обработки проводящих материалов [1]. При давлениях газа 3–30 Па воздействие электронного пучка, генерируемого форвакуумным плазменным источником электронов (ФПИЭ), обеспечивает обработку электрически непроводящих (диэлектрических) материалов [2]. Условия генерации пучка оказывают влияние на его параметры. Тип разряда, используемого в плазменном катоде, тоже оказывает влияние на параметры пучка, а также может влиять на газовые условия в вакуумной камере. В плазменных катодах источников, формирующих пучки электронов при 10^{-4} – 10^{-1} Па, одним из решений последней проблемы является применение контра-

гированного дугового разряда (КДР), использование которого позволяет уменьшить влияние процессов, происходящих в катодной области разряда [1, 3]. Применение КДР в плазменном катode также было реализовано и в ФПИЭ [4]. В настоящей работе исследовано влияние давления газа на формирование электронного пучка в импульсном режиме при его генерации ФПИЭ с плазменным катодом на основе КДР.

Методика проведения эксперимента. Конструкция импульсно-го ФПИЭ с разрядной системой на основе КДР представлена в [4]. Диаметр эмиссионной апертуры в источнике составлял 114 мм. Для исследования формирования импульсного пучка использовался зонд, представляющий собой небольшой цилиндр Фарадея, помещенный в заземленный экран, в котором соосно с цилиндром Фарадея выполнено отверстие радиусом 2,5 мм (рис. 1).

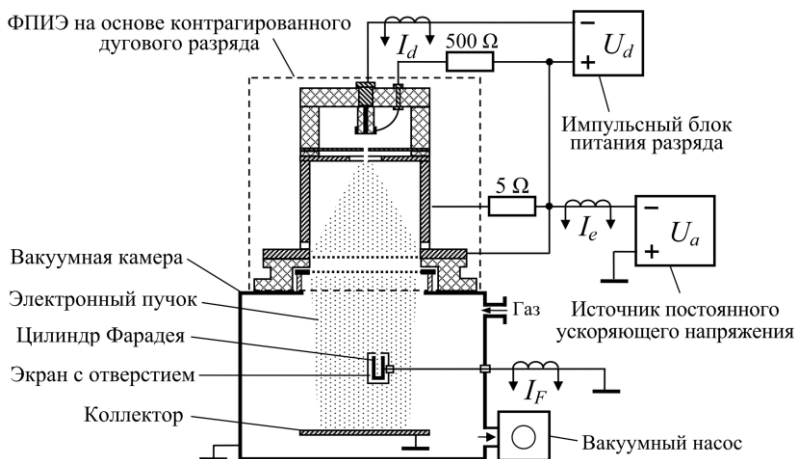


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Зонд устанавливался на расстоянии 10 см от ускоряющего электрода источника (расстояние до плоскости экрана с отверстием) на системе перемещения в вакуумной камере. Токи эмиссии I_e и на цилиндр Фарадея I_F измерялись трансформаторами тока. Исследования проводились при следующих параметрах: ток КДР $I_d = 18$ А при длительности импульсов $\tau_d = 200$ мкс и частоте $\nu = 1$ Гц, ускоряющее напряжение $U_a = 8$ кВ. С помощью систем откачки и напуска газа (N_2) давление регулировалось в диапазоне $p = 8\text{--}12$ Па.

Результаты экспериментов. В ФПИЭ увеличение давления p газа приводит к росту эффективности эмиссии, т.е. увеличению тока I_e

эмиссии при $I_d = \text{const}$, что обусловлено ионным потоком из пучковой плазмы («обратным» ионным потоком) [5]. Для ФПИЭ на основе контрагированного дугового разряда при увеличении p помимо роста тока эмиссии и, соответственно, плотности тока j_e пучка наблюдается существенное изменение профиля распределения пучка. Для сравнения при разном p на рис. 2, *a* построены нормированные распределения плотности тока пучка $j_e/j_{e-\text{max}}$ (радиальная координата r отсчитывалась от оси симметрии). По рис. 2, *a* видно, что при большем p электронный пучок становится шире. Также с ростом давления p сильнее увеличивается скорость нарастания тока I_F на цилиндр Фарадея на периферии пучка (см. рис. 2, *б*). Поскольку расстояние от ускоряющего электрода относительно небольшое, то наблюдаемые зависимости, по-видимому, можно связать с влиянием «обратного» ионного потока, который обеспечивает более быстрое формирование эмиссионной плазмы вблизи эмиссионного электрода источника (т.е. области отбора электронов).

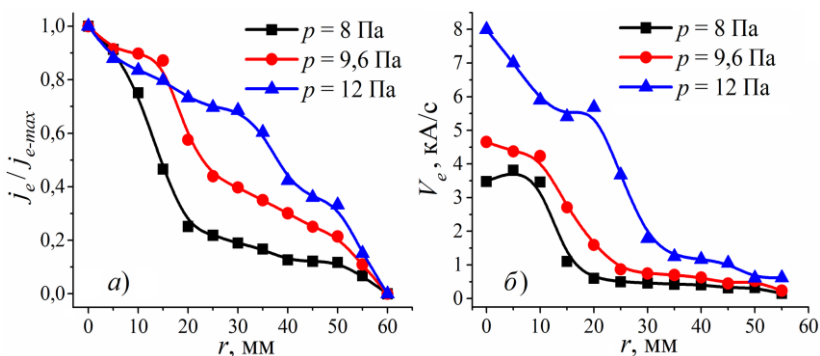


Рис. 2. Нормированные распределения плотности тока пучка (*a*) и зависимости скорости нарастания тока I_F на фронте импульса от радиальной координаты (*б*)

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № FEWM-2023-0012.

ЛИТЕРАТУРА

1. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
- 2.. Климов А.С и др. Применение форвакуумных плазменных источников электронов для обработки диэлектриков. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2017. – 186 с.
3. Девятков В.Н. Плазменный сеточный катод на основе контрагированного дугового разряда низкого давления в неоднородном магнитном поле /

В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль // Изв. высш. учеб. завед. Физика. – 2017. – Т. 60, № 10-2. – С. 32–38.

4. Kazakov A.V. Operating regimes of a constricted arc discharge in a forevacuum-pressure, plasma-cathode electron source of pulsed large-radius electron beams / A.V. Kazakov, E.M. Oks, N.A. Panchenko // Physics of Plasmas. – 2022. – Vol. 29. – Art. No. 103108.

5. Emission characteristics of a forevacuum plasma-cathode source of wide-aperture pulsed electron beam with layer (mesh) stabilization of emission plasma / A.V. Kazakov, A.V. Medovnik, E.M. Oks, N.A. Panchenko // Vacuum. – 2024. – Vol. 227. – Art. No. 113428.

УДК 621.315.592

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМОЭДС НАНОРАЗМЕРНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК

А.С. Терехова, Л.А. Зеленский, студенты каф. ФЭ

Научный руководитель С.В. Смирнов, проф. каф. ФЭ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, tas18102004@mail.ru

Спроектировано устройство для измерения термоЭДС наноразмерных проводящих пленок с последующей обработкой результатов и определением положения уровня Ферми, концентрации свободных носителей заряда в материале, на основании чего определяется пригодность пленок для их дальнейшего использования.

Ключевые слова: проводящие пленки, ИТО, термоЭДС, уровень Ферми, концентрация носителей заряда.

ТермоЭДС является важнейшей характеристикой металлов и полупроводников. Зная значение термоЭДС, можно вычислить такие его электрофизические характеристики, как положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда [1, 2]. Данные параметры необходимы для прогнозирования дальнейшего применения проводящих пленок в электронике.

Устройство, содержащее подвижный термозонд, измеряет термоЭДС наноразмерных проводящих пленок в трех точках, что позволяет повысить точность измерений и представить профиль распределения термоЭДС по поверхности пленки. 3D-модель измерительной части установки представлена на рис. 1.

Движение термозондов производится при помощи шаговых двигателей с винтовой передачей. В драйвере управления используется функция микрошага с делением 1/16, теоретическая точность позиционирования измерительных щупов в этом случае равняется 0,8 мкм.

На рис. 2 представлен внешний вид установки.

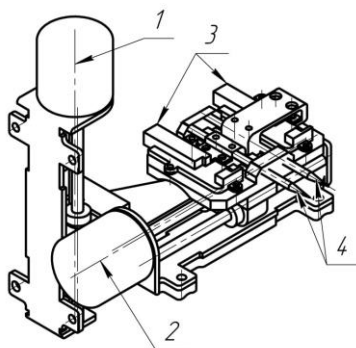


Рис. 1. 3D-модель измерительной части установки: 1 – двигатель оси Y; 2 – двигатель оси X; 3 – двигатели оси Z; 4 – медные электроды

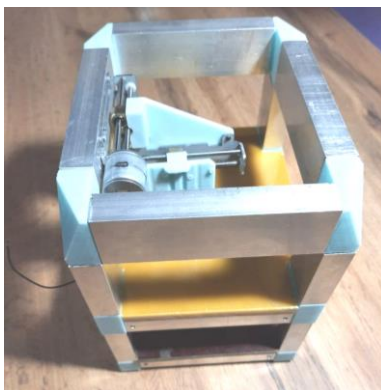


Рис. 21. Внешний вид установки для измерения термоЭДС наноразмерных проводящих пленок

Регистрация напряжения термоЭДС производится 16-битным аналоговым цифровым преобразователем с входным сопротивлением 100 МОм, обработка результатов измерений производится при помощи 8-битного микроконтроллера семейства AVR, ATmega 328p.

Расчет положения уровня Ферми и концентрации носителей заряда производится на ЭВМ с установленным программным обеспечением, реализованным на языке программирования C#.

Спроектированная в ходе выполнения данной работы установка позволяет автоматизировать процесс измерения термоЭДС наноразмерных полупроводниковых и металлических пленок, что может использоваться для контроля их качества и определения пригодности для дальнейшего использования, например в биосенсорах.

Работа выполнена по гранту «Теоретические исследования и экспериментальная разработка оптической приставки для анализа параметров компонентов высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи аналогового и цифрового сигналов».

ЛИТЕРАТУРА

1. Мотт Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н. Мотт, Э. Дэвис. – М.: Мир, 1974. – 472 с.

2. Парфенов О.Е. О температурной зависимости термоЭДС неупорядоченных полупроводников / О.Е. Парфенов, Ф.А. Шклярчук // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41, вып. 9.

ПОДСЕКЦИЯ 2.3

ФИЗИЧЕСКАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Председатель – Троян П.Е., проф. каф. ФЭ, д.т.н.;
зам. председателя – Смирнов С.В., проф. каф. ФЭ, д.т.н.

УДК 539.231

ФОРМИРОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ YSZ-КЕРАМИКИ В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ

А.К. Нестеренко, магистрант каф. ПИШ;

А.А. Андронов, аспирант каф. физики

Научный руководитель А.В. Тюньков, доцент каф. физики, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, alex27.11.01@mail.ru

Представлено исследование влияния условий эксперимента на фазовый состав, микроструктуру покрытия, нанотвердость и модуль упругости покрытия из диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия (YSZ). Получены результаты микроструктуры и фазового состава покрытия YSZ с использованием растровой электронной микроскопии. Также выявлено содержание моноклинной и тетрагональной фаз в структуре покрытия. Представлены результаты измерения нанотвердости и модуля упругости.

Ключевые слова: форвакуумный источник электронов, теплозащитные покрытия, YSZ-керамика.

Современные технологии предъявляют высокие требования к материалам, способным выдерживать экстремальные условия. Керамика на основе диоксида циркония (ZrO_2) обладает комплексом выдающихся свойств: прочностью, термостойкостью, коррозионной устойчивостью и электропроводностью [1], что обуславливает ее широкое применение в различных отраслях. Теплозащитные покрытия (ТЗП) из YSZ широко востребованы в аэрокосмической и нефтегазовой промышленности для повышения эффективности газотурбинных двигателей (ГТД) и увеличения срока службы лопаток турбин.

Целью настоящего исследования является изучение влияния условий эксперимента на характеристики покрытия YSZ, такие как фазовый состав, микроструктура, нанотвердость и модуль упругости.

Методика и техника эксперимента. YSZ-мишень размещалась в графитовом тигле, который, в свою очередь, находился внутри ваку-

умной камеры. Перед началом эксперимента камера подвергалась предварительной откачке до давления 1 Па. Затем в камеру подавался рабочий газ (гелий) до достижения давления 5 Па. Электронный пучок генерировался форвакуумным источником электронов с плазменным катодом и транспортировался сквозь атмосферу рабочего газа. При транспортировке электроны пучка взаимодействовали с атомами рабочего газа и остаточной атмосферы, осуществляя их ионизацию. Пучок позиционировался на YSZ-мишени, вызывая ее испарение. Схема эксперимента более подробно представлена в [2].

Результаты. Изображения поверхности покрытия, полученные при использовании растровой электронной микроскопии, представлены на рис. 1. Как можно отметить, покрытие, полученное в первом случае, отличается большой пористостью и четко различимыми границами треугольных зерен. Размер граней кристаллов от 0,6 до 1 мкм. В случае предварительного нагрева подложки при осаждении паров мишени формируемая структура стала более плотной, состоящей из спрессованных зерен. Такой эффект связан с повышением подвижности атомов, осаждаемых на горячую подложку. Аналогичная картина наблюдается при подаче отрицательного постоянного и импульсного смещения на подложку.

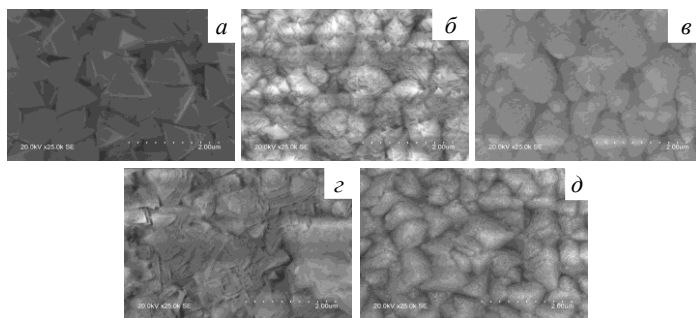


Рис. 1. Результаты растровой электронной микроскопии поверхности: без условий – а; предварительный нагрев до 700 °С в течение 10 мин – б; постоянное смещение $U = 1$ кВ – в; импульсное смещение $U = 1$ кВ – г; нагрев после нанесения покрытия в течение 20 мин – д

Результаты исследования фазового состава покрытий представлены на рис. 2, а. Наибольшее содержание тетрагональной фазы (99%) зафиксировано при предварительном нагреве подложки, однако при отжиге покрытия после нанесения содержание тетрагональной и моноклинной фазы приблизительно равно (55 и 45% соответственно). При подаче отрицательного DC смещения на подложку превалирует

моноклинная фаза (57%), подобный результат наблюдается для покрытия, полученного на образце № 1 (56%). Результаты изменения нанотвердости и модуля упругости полученных покрытий представлены на рис. 2, б. В первом и третьем образце процентное содержание фаз поделено приблизительно поровну, а во втором случае преобладает именно стабилизированная тетрагональная фаза. По-видимому, превращение из тетрагональных в моноклинные увеличивает их объем, создавая напряжение сжатия на поверхности, что приводит к увеличению прочности и твердости.

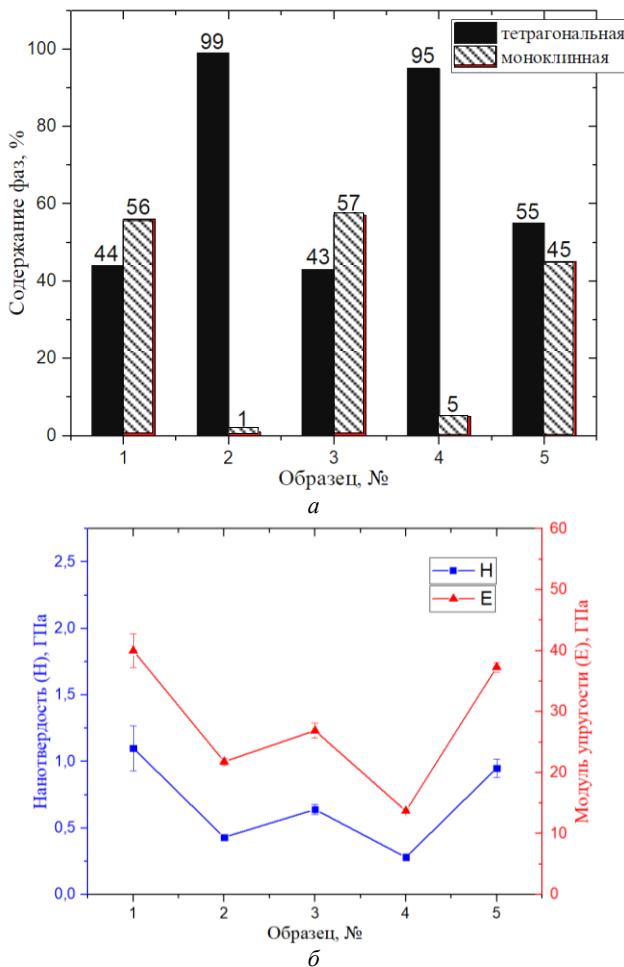


Рис. 2. Фазовый состав покрытий – а; нанотвердость и модуль упругости – б

Заключение. При исследовании микроструктуры замечено, что микроструктура становится более плотной при увеличении энергии частиц, осаждаемых на поверхность подложки. Выявлено, что содержание моноклинной и тетрагональной фазы напрямую влияет на нанотвердость и модуль упругости покрытия.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках конкурса FEWM-2024-0006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stevens R. Engineering properties of zirconia // Engineered Materials. Handbook, ASM International, Ceramics and Glasses. – 1991. – Vol. 4. – P. 775–786.
2. Электронно-лучевое осаждение покрытий из циркониевой керамики форвакуумным плазменным источником электронов / А.А. Андронов, Д.Б. Золотухин, А.Ю. Назаров и др. // Прикладная физика. – 2023. – № 5. – С. 91–96.

УДК 537.533.7

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ РАБОЧЕГО ГАЗА НА МИНИМАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ ДИАМЕТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПРИ ЕГО ФОКУСИРОВКЕ В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ

А.В. Долгова, аспирант каф. физики;

А.А. Зенин, доцент каф. физики, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, weatheraregood@gmail.com

Проведены экспериментальные исследования по измерению диаметра электронного пучка при его фокусировке в диапазоне давлений от 5 до 30 Па при фиксированном токе эмиссии 50 мА и последовательном увеличении ускоряющего напряжения от 8 до 19 кВ. Минимальное значение диаметра пучка, равное 1,4 мм, получено при давлении 30 Па и ускоряющем напряжении 8 кВ, а максимальное значение, равное 2 мм, получено при давлении 5 Па и ускоряющем напряжении 19 кВ.

Ключевые слова: измерение диаметра электронного пучка, фокусировка электронного пучка, форвакуумный источник электронов.

Электронно-лучевые технологии находят широкое применение в настоящее время. Одной из перспективных технологий является электронно-лучевая наплавка порошков [1, 2] – способ получения покрытий путем расплавления порошкового слоя узкофокусированным электронным пучком с высокой удельной плотностью мощности. Однако традиционный способ электронно-лучевой наплавки в вакууме

имеет ряд ограничений, связанных с возникновением поверхностного заряда на поверхности проводящих материалов [3]. Переход в форвакуумный диапазон давлений позволяет компенсировать поверхностный заряд за счет возникновения плотной плазмы в области прохождения электронного пучка.

Важной задачей для указанной технологии является достижение минимального диаметра электронного пучка. На значение диаметра электронного пучка оказывают влияние различные параметры, такие как геометрия фокусирующей системы, род и давление рабочего газа, ускоряющее напряжение, ток эмиссии и др.

Целью работы является определение влияния давления рабочего газа на минимальный диаметр электронного пучка при его фокусировке в форвакуумной области давлений.

Методика эксперимента. Эксперименты по измерению диаметра электронного пучка проводились на установке, схема которой показана на рис. 1. Форвакуумным насосом проводилась откачка остаточной амосферы в рабочей камере до максимально возможного давления, а затем в рабочую камеру напускался рабочий газ (гелий) для достижения необходимого для проведения эксперимента давления в рабочей камере.

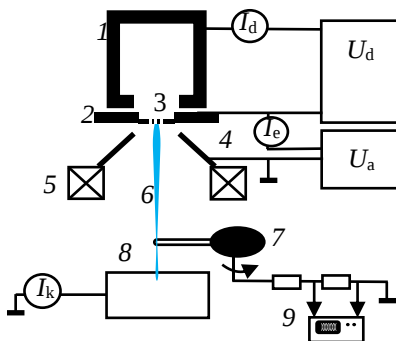


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – полый катод; 2 – анод; 3 – перфорированный электрод; 4 – экстрактор;
5 – фокусирующая система; 6 – электронный пучок; 7 – вращающийся двойной зонд; 8 – коллектор; 9 – осциллограф; U_d – источник питания разряда;

U_a – источник ускоряющего напряжения; I_d – сила тока разряда;

I_e – сила тока эмиссии; I_k – сила тока пучка, приходящего на коллектор

Разрядная система состоит из цилиндрического полого катода 1, плоского анода 2 с эмиссионным окном, в котором располагается перфорированный электрод 3, и конусовидного экстрактора 4. В экс-

периментах использовался перфорированный электрод с 1 основным эмиссионным отверстием диаметром 0,75 мм и 7 вспомогательными отверстиями.

Сформированный электронный пучок 6 фокусировался с помощью фокусирующей системы 5, представляющей собой цилиндрическую фокусирующую катушку с внешним диаметром 12 см, внутренним диаметром 8 см, высотой 5 см и сопротивлением 89 Ом.

Вращающийся двойной зонд 7 осуществляет сканирование электронного пучка, сигнал с зонда регистрируется осциллографом 9. По осциллограммам тока, протекающего через зонд, на полувысоте распределения определяется диаметр пучка.

Для определения влияния давления рабочего газа были проведены серии экспериментов по определению диаметра электронного пучка при фиксированном токе эмиссии 50 мА с увеличением ускоряющего напряжения от 8 до 19 кВ для различных значений давления рабочего газа в камере.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 приведена зависимость диаметра электронного пучка от ускоряющего напряжения при токе эмиссии 50 мА для различных значений давления газа в рабочей камере.

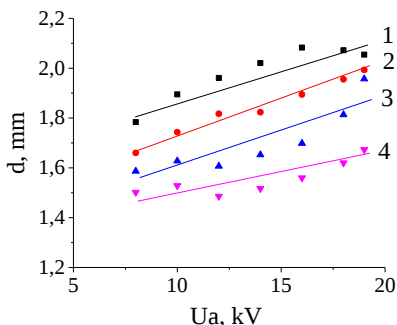


Рис. 2. Зависимость диаметра пучка от ускоряющего напряжения для различных значений давления газа в рабочей камере:
1 – 5 Па; 2 – 9 Па; 3 – 14 Па; 4 – 30 Па

Из рис. 2 видно, что наблюдается линейная зависимость диаметра электронного пучка от ускоряющего напряжения при всех рассмотренных значениях давления рабочего газа. Кроме того, с увеличением давления уменьшается как значение минимального диаметра пучка, так и угол наклона его зависимости от ускоряющего напряжения.

Закключение. В результате проведенного исследования определено, что при работе в диапазоне давлений от 5 до 30 Па успешно

может проводиться фокусировка электронного пучка в пятно диаметром от 1,4 до 2 мм при фиксированном токе эмиссии 50 мА.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10037, <https://rscf.ru/project/24-79-10037/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Körner C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting – a review // International Materials Reviews. – 2016. – Vol. 61, № 5. – P. 361–377.

2. Electron beam powder bed fusion of copper components: a review of mechanical properties and research opportunities / E. Sharabian, M. Leary, D. Fraser, S. Gulizia // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2022. – Vol. 122. – P. 513–532.

3. Powder smoking phenomenon in electron beam powder bed fusion: A comprehensive review of prediction, monitoring and mitigation methods / A.K. Mehta, G. Gote, G. Mittal, Y. Patil, K.P. Karunakaran // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 127. – P. 314–327.

УДК 544.541

ВЛИЯНИЕ ФЛЮЕНСА ЭЛЕКТРОНОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОШКА CaSiO_3 , МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ CeO_2

М.М. Михайлов, зав. лаб. РКМ, д.ф.-м.н.;

*Д.С. Федосов, аспирант каф. ФЭ; В.А. Горончко, с.н.с. лаб. РКМ,
к.т.н.; А.Н. Лапин, в.н.с. лаб. РКМ, к.т.н.; С.А. Юрьев, в.н.с.
лаб. РКМ, к.т.н.; С.П. Иваничко, аспирант каф. ФЭ*

г. Томск, ТУСУР, dmitrii.s.fedosov@tusur.ru

Изучено влияние модифицирования силиката кальция наночастицами диоксида церия на изменение коэффициента поглощения солнечного излучения (α_s). Для расчёта коэффициента поглощения использовались спектры диффузного отражения (ρ_λ). Эксперименты проводились в условиях вакуума с облучением образцов электронами в диапазоне флюенса $\Phi = (1-7) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ при энергии 30 кэВ. Установлено, что при концентрации наночастиц диоксида церия 3 мас.% модифицированный микропорошок силиката кальция демонстрирует повышенную радиационную стойкость от 1,31 до 4,30 раза в зависимости от флюенса электронов. Модифицированный порошок можно использовать в качестве пигмента для терморегулирующих покрытий космических аппаратов класса «Оптические солнечные отражатели».

Ключевые слова: космические аппараты, терморегулирующие покрытия, радиационная стойкость, нанотехнологии, силикат кальция, диоксид церия.

Надежность работы космических аппаратов (КА) зависит от блоков и устройств, входящих в его конструкцию. К ключевым элементам, определяющим работоспособность КА, относятся системы энергоснабжения (солнечные батареи и устройства передачи энергии), системы связи (антенно-фидерные устройства), а также системы теплового регулирования, включающие радиаторы с терморегулирующими покрытиями, охлаждающие газы и средства их хранения и перекачки.

Поскольку при увеличении времени активного существования КА возрастают требования ко всем системам, в том числе и к системам терморегулирования: Терморегулирующие покрытия (ТРП) должны обладать повышенной фото- и радиационной стойкостью к действию облучения космического пространства. Одним из эффективных направлений и способов достижения этого требования является модифицирование наночастицами. Полученные к настоящему времени результаты на различных материалах с использованием наночастиц различных типов и классов, обладающих различными размерами и удельной поверхностью, показывают [1–3], что стойкость к облучению свойств и рабочих характеристик материалов может быть увеличена от десятков процентов до нескольких раз. При этом одной из перспективных технологий является использование в качестве модификаторов порошков оксидов металлов с катионами редкоземельных элементов (РЗЭ). Такие порошки способны уменьшать концентрацию образованных при облучении первичных дефектов за счет протекания двух процессов: релаксации на наночастицах, как на дефектах кристаллических структур малых размеров и релаксации на катионах РЗЭ с незаполненной внутренней *f*-оболочкой.

Целью настоящего исследования является анализ изменений коэффициента поглощения a_s как основной рабочей характеристики ТРП при облучении электронами исходного порошка $mCaSiO_3$ и модифицированного наночастицами $nCeO_2$.

В работе использован порошок микронных размеров ($mCaSiO_3$), изготовленный компанией ООО «Минерал» (Россия), а также наноразмерный порошок диоксида церия ($nCeO_2$), произведённый компанией China Rare Metal Material Co., LTD (Китай).

Методика модифицирования микропорошка $mCaSiO_3$ 3 мас.% наночастицами $nCeO_2$ схематично представлена на рис. 1.

Условия регистрации спектров диффузного отражения приведены в работе [4]. Интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения (a_s) рассчитанный по спектрам ρ_λ , в соответствии с международными стандартами [5, 6], равен 0,121 для исходного микропо-

рошка CaSiO_3 и 0,155 для модифицированного пигмента $\text{mCaSiO}_3 + 3 \text{ мас.}\% \text{ nCeO}_2$ соответственно.



Рис. 1. Методика получения модифицированного пигмента $\text{mCaSiO}_3 + 3 \text{ мас.}\% \text{ nCeO}_2$

На рис. 2 представлена зависимость изменения интегрального коэффициента поглощения (Δa_s) для исходного микропорошка mCaSiO_3 и порошка, модифицированного наночастицами nCeO_2 , от флюенса электронов с энергией 30 кэВ.

Изменения коэффициента поглощения Δa_s модифицированного наночастицами порошка значительно меньше по сравнению с немодифицированным порошком. Коэффициент эффективности модифицирования, определяемый как отношение величин Δa_s немодифицированного порошка Δa_{s0} к соответствующим значениям для модифицированного порошка Δa_{sm} составляет 4,33; 2,72; 2,03; 1,52 и 1,31 для флюенса электронов $(1, 2, 3, 5 \text{ и } 7) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ соответственно.

Выполненные исследования показали, что модифицирование порошка микронных размеров mCaSiO_3 наночастицами nCeO_2 приводит к повышению радиационной стойкости при облучении электронами с энергией 30 кэВ флюенсом $\Phi = (1 - 7) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

Коэффициент эффективности, определённый на основе соотношения изменений интегрального коэффициента поглощения немодифицированного порошка к аналогичным изменениям модифицированного порошка после электронного облучения, варьирует в диапазоне от 1,31 до 4,33 в зависимости от величины флюенса электронов. Отсюда можно сделать вывод, что модифицирование микропорошка mCaSiO_3 наночастицами nCeO_2 может быть использовано для произ-

водства нового стойкого к действию ионизирующих излучений пигмента для терморегулирующих покрытий космических аппаратов класса «Оптические солнечные отражатели».

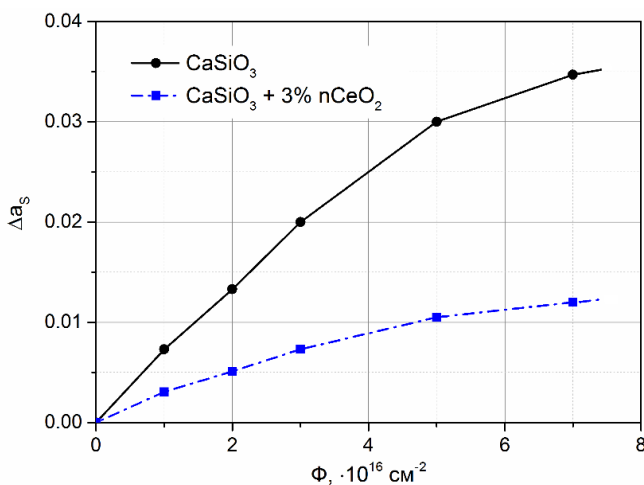


Рис. 2. Зависимость изменений интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения исходного микропорошка mCaSiO_3 и модифицированного 3 масс.% нано- nCeO_2 от флюенса электронов с энергией 30 кэВ

Исследование выполнено при финансовой поддержке госзадания № FEWM-2023-0012 Министерства науки и Высшего образования РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mikhailov M.M. The Optical Properties and Radiation Stability of Metal Oxide Powders Modified with Nanoparticles. – Cambridge, 2023. – 296 p.
2. Юрина В.Ю. Оптические свойства и радиационная стойкость полых частиц оксида алюминия и диоксида кремния: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 1.3.8. – Томск, 2022. – 141 с.
3. Нецименко В.В. Исследование структуры, свойств радиационной стойкости оксидных порошков, модифицированных наночастицами: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 1.3.8. – Томск, 2017. – 272 с.
4. Reflective thermal control coating for spacecraft based on ZnO pigment and Li_2SiO_3 silicate modified by SiO_2 nanoparticles / M.M. Mikhailov, S.A. Yuryev, A.N. Lapin, V.A. Goronchko // Ceramics International. – 2023. – Vol. 49, № 12. – C. 20817–20821.
5. ASTM E490 – 00a Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, 2019.
6. ASTM E903-20 Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres, 2020.

ОТКЛОНЕНИЕ СФОКУСИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПОВОРОТНОЙ МАГНИТНОЙ КАТУШКОЙ

Г.А. Касьянов, студент; А.С. Климов, проф. каф. физики;

И.Ю. Бакеев, доцент каф. физики; А.А. Лыман, студент

г. Томск, ТУСУР, gleb.kas.1990@mail.ru

Продemonстрировано изменение угла отклонения электронного пучка при изменении токов двух групп витков поворотной катушки. Для всех ускоряющих напряжений зависимости угла поворота электронного пучка от токов, подаваемых на группы витков поворотной катушки, не выявлено. Определены конфигурации токов групп витков, где наблюдается минимальное отклонение по обемам.

Ключевые слова: отклонение, электронный пучок, поворотная катушка.

В процессе форвакуумной электронно-лучевой обработки материалов происходит попадание частиц испаряемых веществ в разрядный промежуток плазменного источника, что приводит к сбою стабильного горения разряда. В качестве защиты используется поворот электронного пучка на значительный угол. Для поворота пучка используются как электростатическое, так и магнитные поля.

Отклонение в электростатическом поле осуществляется при прохождении пучка между двумя параллельными пластинами с потенциалом порядка киловольт. Основным недостатком метода в условиях форвакуума является зажигание тлеющего разряда между пластинами, который не будет оказывать влияния на электроны [1].

Электронный пучок отклоняют в продольном и поперечном магнитных полях. Влияние на движение электронов зависит от того, на какую компоненту скорости воздействует поле, радиальную или продольную. Главным недостатком отклонения в продольном поле является отклонение пучка на малый угол, так как воздействие идет на радиальную составляющую, имеющую значительно меньшее значение, чем продольная [2]. Основной недостаток отклонения пучка в поперечном поле заключается в сильном разбросе по энергиям электронов, вследствие чего наблюдается расфокусировка пучка [3].

Цель настоящей работы заключалась в расчете угла отклонения электронного пучка, прошедшего через изогнутую на 90° поворотную катушку с продольным магнитным полем, построенную по программе для моделирования физических процессов, в зависимости от тока катушки, не претерпевшего сильного расхождения.

Моделируемое устройство представляет четверть тороида из стали с намотанной на нее медной проволокой. Размеры: внутренний диаметр – 40 мм, внешний радиус – 57 мм, толщина стенок – 2 мм, количество витков проволоки – 850, диаметр проволоки – 0,5 мм. Модель предназначалась для расчета траектории пучка, испускаемого из источника с ускоряющим потенциалом 6, 8, 10 и 12 кВ.

Для настройки угла поворота пучка витки катушки были разделены на две равные группы, и ток подавался на них независимо.

Эксперимент состоял в варьировании токов, подаваемых на обе группы витков поворотной катушки с фиксированием угла отклонения электронного пучка по осям Ox и Oy для каждого ускоряющего напряжения. Ток, подаваемый на 1-ю группу витков поворотной катушки, изменялся от 3 до 5 А, ток второй группы изменялся в пределах до ± 3 А от тока первой группы. Ток для первой группы витков был выбран исходя из того, что при токе менее 3 А электронный пучок не выходил из поворотного устройства, так как поглощался внутри катушки, выше 5 А наблюдалась сильная расфокусировка пучка на выходе.

Результаты. В таблице представлена зависимость углов отклонения электронного пучка по осям Ox и Oy при различных токах, подаваемых на группы витков поворотной катушки и при различных ускоряющих напряжениях. Как видно из таблицы, не наблюдается закономерности в зависимости угла для любого тока первой группы витков и любого значения ускоряющего напряжения.

Углы отклонения для различных токов обеих групп витков поворотной катушки при различных ускоряющих напряжениях

Ток, А		Ускоряющее напряжение, кВ							
		6		8		10		12	
		Угол, град							
1-я гр.	2-я гр.	Ox	Oy	Ox	Oy	Ox	Oy	Ox	Oy
5	8	22	21	23	12	25	27	18	23
5	7	19	18	27	27	19	26	22	17
5	6	25	15	20	28	21	19	30	24
5	5	27	27	17	22	26	25	28	33
5	4	16	27	27	27	25	34	19	33
4	6	31	27	21	18	33	24	30	33
4	5	19	22	31	26	28	34	22	31
4	4	25	25	28	35	17	32	20	28
4	3	23	33	19	32	21	28	—	—
3	4	27	33	22	30	31	36	34	33
3	3	21	31	25	30	29	35	32	41
3	2	—	—	—	—	29	41	—	—

Для всех ускоряющих напряжений при определенной конфигурации токов на группах витков существует состояние, при котором наблюдается наименьшее отклонение по обеим осям:

– при 6 кВ и токе в первой группе 5 А и второй 7 А отклонение по оси Ox 19 град, по Oy – 19 град;

– при 8 кВ и токе в первой группе 5 А и второй 5 А отклонение по оси Ox 17 град, по Oy – 22 град;

– при 10 кВ и токе в первой группе 5 А и второй 6 А отклонение по оси Ox 21 град, по Oy – 19 град;

– при 12 кВ и токе в первой группе 5 А и второй 7 А отклонение по оси Ox 22 град, по Oy – 17 град.

Заключение. В рамках работы продемонстрировано изменение угла отклонения электронного пучка при изменении токов, подаваемых на две группы витков поворотной катушки. Определены конфигурации токов групп витков, где наблюдается минимальное отклонение по обеим осям в зависимости от ускоряющего напряжения.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках конкурса FEWM-2024-0006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Schultz H. Electron Beam Welding. – C: Abington Publishing, 1993. – 240 p.
2. Рогинский Л.А. Динамика интенсивных электронных пучков в криволинейных транспортных каналах с продольным магнитным полем // Журнал технической физики. – 1985. – Т. 8, вып. 55. – С. 1506–1511.
3. О возможности прецизионной электронно-лучевой обработки протяженных диэлектрических изделий плазменным источником электронов в форвакууме / И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин, А.С. Климов, Е.М. Окс // Прикладная физика. – 2017. – Т. 3, № 5. – С. 26 – 30.

УДК 537.525

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ПРИ ОСАЖДЕНИИ НИЗКООМНЫХ ПЛЕНОК ИТО МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

*Ю.С. Жидик, в.н.с. ЛИОР каф. ФЭ ТУСУР, н.с. ИОА СО РАН,
к.т.н.; А.В. Москалев, студент каф. ФЭ
г. Томск, ТУСУР, iurii.s.zhidik@tusur.ru*

Приведены результаты исследования характеристик плазмы газового разряда при осаждении пленок ИТО магнетронным распылением. Электрофизические свойства ИТО в значительной степени определяются соотношением Ar / O_2 в рабочей газовой атмосфере. Пока-

зано, что ток магнетронного разряда, падение напряжения и спектр излучения плазмы газового разряда существенно зависят от изменения потока напускаемого кислорода. Установленный факт можно использовать для контроля корректности соотношения Ag / O_2 при осаждении ИТО.

Ключевые слова: ИТО, реактивное магнетронное распыление, спектр излучения плазмы магнетронного разряда.

ИТО является широко востребованным прозрачным проводящим материалом в производстве оптоэлектронных приборов и электронных устройств [1, 2]. Однако, несмотря на широкое применение пленок ИТО, процесс их осаждения остается сложной задачей, требующей тщательного контроля и оптимизации. Для указанных применений пленки ИТО наиболее часто синтезируют методом реактивного магнетронного распыления мишени из сплава индий-олово в атмосфере смеси газов Ag / O_2 . Причем электрофизические свойства осаждаемых пленок прежде всего определяет соотношение Ag / O_2 , которое можно контролировать по параметрам плазмы газового разряда [2].

Целью работы является исследование параметров плазмы газового разряда при осаждении пленок ИТО методом реактивного магнетронного распыления в условиях разного потока напускаемого кислорода.

При проведении исследований пленки ИТО осаждались методом реактивного магнетронного распыления мишени $\text{In} (90\%) / \text{Sn} (10\%)$ в атмосфере из смеси газов Ag / O_2 на установке EPOS-PVD по технологии, близкой к [3]. Газовый поток напуска Ag во время напыления составлял 2 л/ч и обеспечивал стабильный магнетронный разряд в диапазоне давлений $(4-6) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Газовый поток напуска O_2 во время исследований варьировался в диапазоне от 0 до 1 л/ч. Температура подложек составляла 300 °С. Мощность разряда поддерживалась постоянной и составляла 40 Вт.

На рис. 1 приведены зависимости изменения тока и падения напряжения в плазме газового разряда при изменении газового потока напуска кислорода.

Значительное снижение тока газового разряда и, соответственно, увеличение падения напряжения в разрядном промежутке наблюдается при увеличении потока напуска кислорода в рабочую камеру до 0,6 л/ч. Это обусловлено переходом работы магнетрона в оксидном режиме, связанным с окислением поверхности распыляемой мишени. Экспериментально было подтверждено, что именно при газовом потоке напуска кислорода 0,6 л/ч осаждаемые пленки ИТО имеют наименьшее удельное сопротивление и высокую оптическую прозрачность.

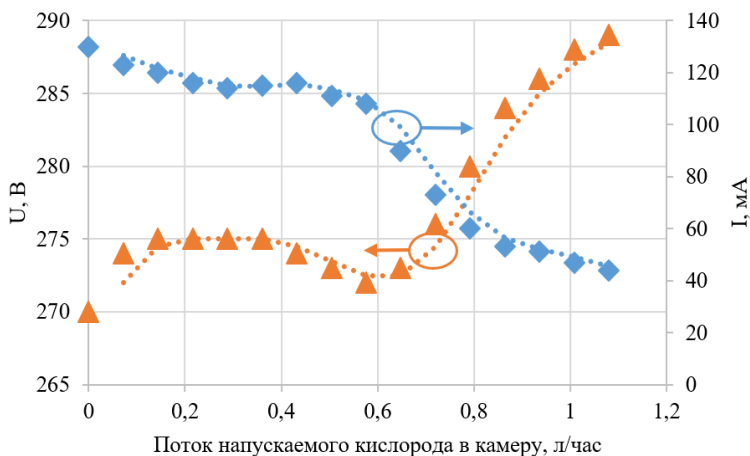


Рис. 1. Зависимости изменения тока и падения напряжения в плазме газового разряда при изменении газового потока напуска кислорода

Эмиссионные спектры плазмы, полученные в ходе распыления мишени при разных потоках напускаемого кислорода, приведены на рис. 2.

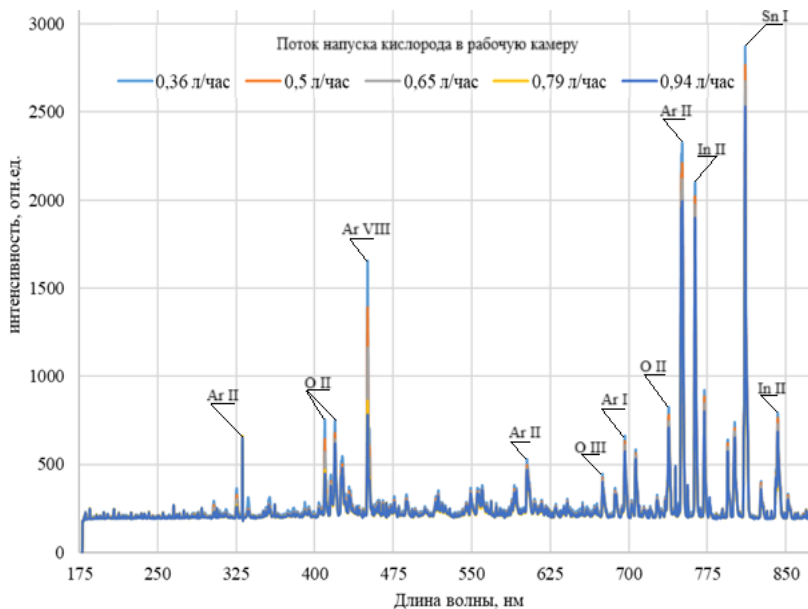


Рис. 2. Эмиссионные спектры плазмы при осаждении ИТО для разных потоков напуска кислорода

Расшифровка эмиссионных линий излучения плазмы газового разряда осуществлялась по базе данных «Atomic Spectra Database» [4].

Полученные эмиссионные спектры плазмы магнетронного разряда также отражают зависимость изменения интенсивности спектральных линий излучения при изменении потока напускаемого кислорода. Интенсивность спектральных линий излучения пропорционально снижается при изменении потока напускаемого кислорода и может быть использована для отслеживания корректности состава рабочей газовой атмосферы при осаждении пленок ИТО.

Таким образом, проведенные исследования показали, что характеристики плазмы газового разряда можно использовать для контроля корректности соотношения Ag / O_2 в смеси газовой атмосферы, что является важным условием при осаждении низкоомных пленок ИТО.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семикина Т.В. Оксидная электроника как одно из направлений прозрачной электроники / Т.В. Семикина, В.Н. Комащенко, Л.Н. Шмырева // Электроника и связь. – 2010. – № 3. – С. 20–28.
2. Троян П.Е. Прозрачные электропроводящие покрытия с контролируемыми значениями коэффициента пропускания и поверхностного сопротивления / П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров, Ю.С. Жидик // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 1 (31). – С. 99–102.
3. Zhidik Y. Nanoscale ITO Films for Plasmon Resonance-Based Optical Sensors / Y. Zhidik, A. Ivanova, S. Smirnov, K. Zhuk, I. Yunusov, P. Troyan // Coatings. – 2022. – № 12 (12). – P. 1868.
4. Atomic Spectra Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>, свободный (дата обращения: 16.03.2025).

УДК 537.533.9

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ФОРВАКУУМНОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ

А.В. Казаков, с.н.с., к.т.н.; Н.А. Панченко, доцент, к.ф.-м.н.;

А.Е. Петров, аспирант

г. Томск, ТУСУР, каф. физики, a.e.petrov_job@mail.ru

При облучении импульсным электронным пучком в форвакууме варьирование энергией пучка в импульсе позволяет изменять шеро-

ховатость поверхности керамики из диоксида циркония, стабилизированного Y_2O_3 .

Ключевые слова: циркониевая керамика, импульсный электронный пучок, модификация поверхности.

Керамика из диоксида циркония широко используется в различных отраслях промышленности благодаря своим свойствам, таким как, например, высокая термическая стойкость, которая позволяет применять керамику для термостойких покрытий [1], высокая биоинертность и биосовместимость, что дает возможность использовать ее для протезирования в стоматологии [2]. Для получения или улучшения свойств поверхности керамики, представляющих интерес для практического применения, используют поверхностную обработку, например, потоками ускоренных ионов (ионными пучками) [3] и высокоэнергетичных (> 100 кэВ) электронов (электронными пучками) [4]. Обработка низкоэнергетичными (до десятков кэВ) электронными пучками при низких давлениях приводит к образованию слоя отрицательного заряда на керамической поверхности, что снижает эффективность обработки. Данная проблема может быть решена с помощью форвакуумных плазменных источников электронов, которые работают при давлениях до 30 Па, что обеспечивает полную или частичную нейтрализацию зарядки поверхности непроводящих материалов [6].

В настоящей работе показаны результаты исследования по влиянию обработки импульсным электронным пучком в форвакуумной области давлений на поверхности керамики из диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия.

Методика проведения эксперимента. Дискообразные образцы (диаметр 10 мм, толщина 3 мм), выполненные из диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия Y_2O_3 (содержание – 5,15%), размещались в вакуумной камере в тиглях, которые были закреплены на системе перемещения, что позволяло обрабатывать несколько образцов за один цикл откачки (рис. 1). Блок питания и управления обеспечивал регулировку параметров плазменного источника электронов (описание источника представлено в [6]), который генерировал электронный пучок большого радиуса. Обработка пучком осуществлялась при давлении газа (гелий) в вакуумной камере $p = 8$ Па, энергии электронов 8 кэВ и постоянной мощности пучка в импульсе 350 кВт/имп., а энергия пучка в импульсе E_p изменялась длительностью импульса. Диаметр пучка в области размещения образцов составлял 20 мм. Каждый образец облучался 3 импульсами. Характеристики поверхности образцов исследовались с помощью бесконтактного оптического профилометра 3D-SuperView W1.

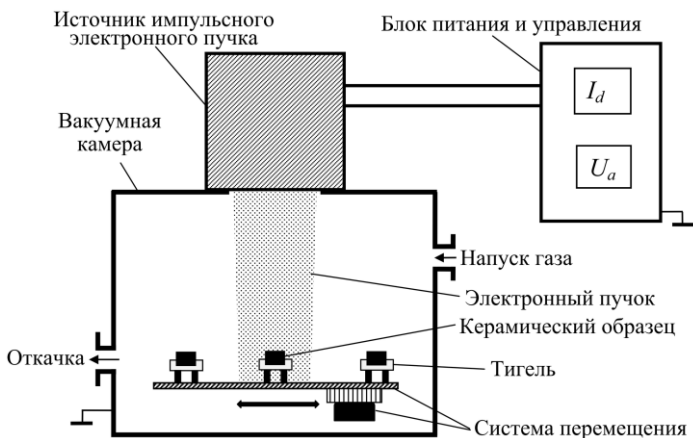
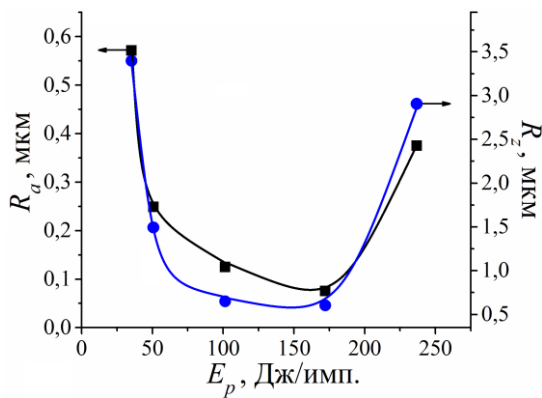


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

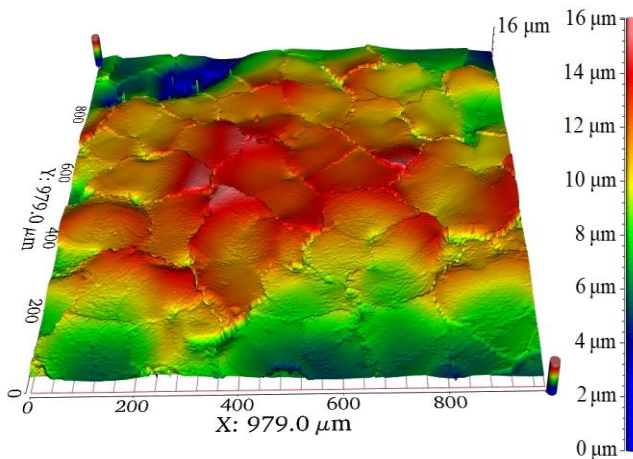
Результаты экспериментов. На рис. 2, *а* представлен график зависимости параметров шероховатости R_a и R_z от энергии пучка в импульсе E_p . При заданной мощности электронного пучка в импульсе увеличение энергии в импульсе обеспечивает уменьшение R_a и R_z , т.е. уменьшение шероховатости поверхности при E_p около 175 Дж/имп. При E_p более 175 Дж/имп. воздействие пучка приводит к увеличению параметров R_a и R_z , т.е. увеличению шероховатости поверхности.

Анализ морфологии по 3D-изображениям поверхности керамики показал, что это связано с формированием «чешуйчатой» структуры на поверхности образцов (рис. 2, *б*).



а

Рис. 2 (начало)



б

Рис. 2 (окончание). Зависимость параметров шероховатости R_a и R_z от энергии пучка в импульсе E_p (а); структура поверхности керамики при $E_p = 237$ Дж/имп. (б)

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках конкурса FEWM-2024-0006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Overview on advanced thermal barrier coatings / R. Vaßen, M.O. Jarligo, T. Steinke, D.E. Mack, D. Stöver // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205, No. 4. – P. 938–942.
2. A review of zirconia as a dental restorative material / N.F. Amat, A. Muchtar, N. Yahaya, M.J. Ghazali // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. – 2012. – Vol. 6, No. 12. – P. 9–13.
3. Гынгазов С.А. Модификация структуры и механических свойств оксидной керамики ионной обработкой / С.А. Гынгазов, В.А. Болтуева // *Вестник Сибирского гос. индустр. ун-та*. – 2023. – № 2. – С. 28–39.
4. Properties of zirconium dioxide ceramics irradiated with high doses of pulsed electron beam / S. Nikiforov et al. // *Thermoluminescent and Dosimetric. Crystals*. – 2023. – Vol. 13. – Art. No. 1585.
5. Electron beam treatment of non-conducting materials by a fore-pump-pressure plasma-cathode electron beam source / V.A. Burdovitsin, A.S. Klimov, A.V. Medovnik, E.M. Oks // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2010. – Vol. 19, No. 5. – Art. No. 055003.
6. Broad-beam plasma-cathode electron beam source based on a cathodic arc for beam generation over a wide pulse-width range / A.V. Kazakov, A.V. Medovnik, E.M. Oks, N.A. Panchenko // *Review of Scientific Instruments*. – 2020. – Vol. 91. – Art. No. 093304.

УМЕНЬШЕНИЕ ДЛИНЫ ЗАТВОРА ЗА СЧЕТ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИСТЕНОЧНОГО ДИЭЛЕКТРИКА НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ GaN-HEMT

*А.Е. Шестериков, Д.А. Шестерикова, студенты каф. ФЭ
Научный руководитель П.Е. Троян, проф., д.т.н., зав. каф. ФЭ
г. Томск, ТУСУР, shesterikov.a.e@mail.ru*

Представлены результаты исследования возможности уменьшения длины затвора транзистора за счет формирования пристеночного диэлектрика на основе нитрида кремния для массового производства GaN-СВЧ МИС без использования электронно-лучевой литографии. Было исследовано влияние толщины второго слоя Si_3N_4 , а также времени травления данного слоя на уменьшение размера затвора GaN-HEMT.

Ключевые слова: Si_3N_4 , GaN, HEMT, пристеночный диэлектрик, длина затвора.

Технология GaN-HEMT может применяться в высокочастотных усилителях мощности и рассматривается различными производителями как одна из ключевых технологий изготовления СВЧ- и силовых полупроводниковых приборов [1–3].

В массовом производстве GaN-монолитных интегральных схем (МИС) самой сложной и времязатратной операцией является формирование Т-образного затвора. При размере затвора менее 0,5 мкм стандартная контактная оптическая литография не позволяет обеспечить требуемую разрешающую способность при формировании окон в маске фоторезиста. В связи с этим большинство производителей используют электронно-лучевую литографию (ЭЛЛ) для прорисовки затворов менее 0,5 мкм [4]. В результате увеличивается время, затрачиваемое на производство СВЧ МИС, а как следствие и их стоимость.

Целью данной работы является исследование возможности уменьшения длины затвора транзистора за счет формирования пристеночного диэлектрика на основе нитрида кремния для массового производства GaN-СВЧ МИС без использования электронно-лучевой литографии.

Методика эксперимента. На первом этапе технологического процесса на подложку наносится слой диэлектрика Si_3N_4 толщиной 100 нм на установке PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition). В данном слое формируется окно длиной L_0 методом контактной фотолитографии с последующим анизотропным реактивным ионным травлением (РИТ) в ICP-реакторе. Затем на полученную структуру конформно осаждается второй слой Si_3N_4 толщиной h_2 в

установке PECVD. После этого проводится анизотропное реактивное ионное травление по всей площади пластины до первого слоя Si_3N_4 . В результате за счет большей толщины диэлектрика в боковых областях исходного окна образуются дополнительные области пристеночного диэлектрика из нитрида кремния, что позволяет уменьшить эффективную длину затвора транзистора без использования электронно-лучевой литографии. На рис. 1 представлена схема, поясняющая принцип уменьшения длины затвора за счет формирования пристеночного диэлектрика, а также схема разделения подложки на образцы.

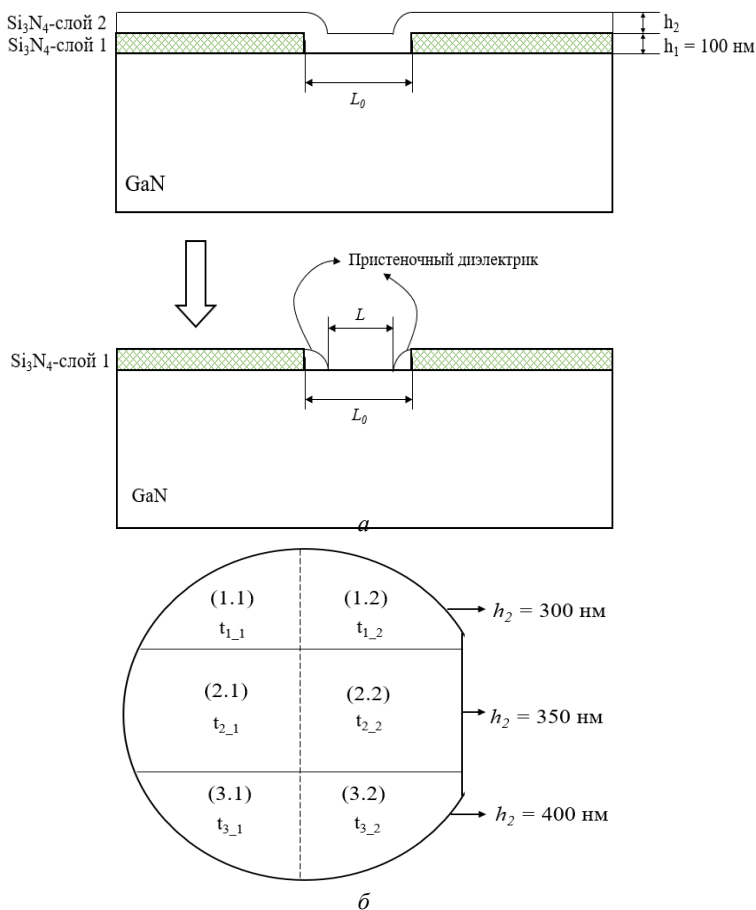


Рис. 1. Принцип уменьшения длины затвора за счет формирования пристеночного диэлектрика (а) и схема разделения подложки на образцы (б)

Результаты и их анализ. На рис. 2 представлены карта распределения толщины первого слоя Si_3N_4 по поверхности пластины после осаждения на установке PECVD, а также результаты измерения длины затворов после травления окна через фоторезистивную маску.

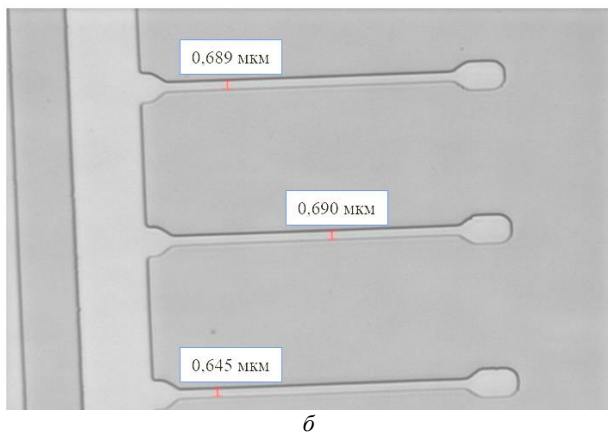


Рис. 2. Карта распределения толщины первого слоя Si_3N_4 по поверхности пластины (а) и результаты измерения длины затворов (б)

Из полученных данных среднее значение длины окна в маске после травления первого слоя Si_3N_4 составило 0,67 мкм. В таблице представлены результаты осаждения и травления второго слоя Si_3N_4 .

Результаты осаждения и травления второго слоя Si_3N_4				
№	Требуемая h_2 , нм	Реальная h_2 , нм	Процент перетрав	$t_{\text{тр}}$, с
(1.1)	300	283,5	0	193
(1.2)			10	212
(2.1)	350	347,9	0	237
(2.2)			10	261
(3.1)	400	388,9	0	265
(3.2)			10	292

Для измерения результирующей длины затвора после осаждения и травления второго диэлектрического слоя для каждого из образцов были изготовлены сколы и произведено измерение размеров методом сканирующей электронной микроскопии на установке Raith150. Абсолютная погрешность при проведении измерений составляла $\Delta = 10$ нм. На рис. 3 представлена зависимость длины затвора после осаждения и травления второго слоя Si_3N_4 от толщины данного слоя и времени травления.

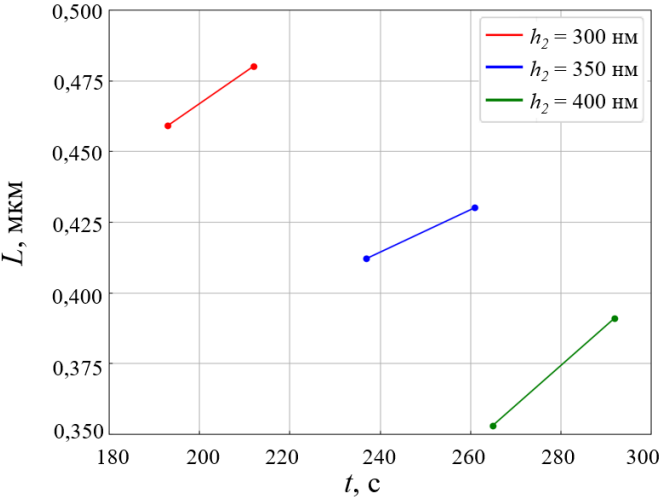


Рис. 3. Зависимость длины затвора после осаждения и травления второго слоя Si_3N_4 от толщины данного слоя и времени травления

Из зависимости на рис. 3 видно, что с увеличением толщины второго слоя Si_3N_4 уменьшается длина затвора GaN-HEMT, что говорит о

возможности использования данного метода в технологии массового производства МИС без использования электронно-лучевой литографии. Также с ростом времени травления второго диэлектрического слоя результирующая длина затвора транзистора увеличивается из-за растравливания пристеночного диэлектрика. По этой причине важно подбирать минимальное время травления, требуемое для открытия окон под затворы по всей полупроводниковой пластине.

ЛИТЕРАТУРА

1. Iucolano F. GaN-on-Si HEMTs for wireless base stations / F. Iucolano, T. Boles // *Materials Science in Semiconductor Processing*. – 2019. – Vol. 98. – P. 100–105.
2. Cho Y. et al. Linear Doherty power amplifier with an enhanced back-off efficiency mode for handset applications // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2014. – Vol. 62, № 3. – P. 567–578.
3. A Madero-Ayora M.J. et al. Linearization and EVM enhancement of an efficient class J amplifier for 3G and 4G mobile communication signals // *2012 Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits*. – IEEE, 2012. – P. 1–3.
4. Sun B. et al. Single step electron-beam lithography archiving lift-off for T-gate in high electron mobility transistor fabrication // *Microelectronic Engineering*. – 2020. – Vol. 229. – P. 111337.

УДК 621.315.5

ПЕРСПЕКТИВЫ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ GaN

А.А. Шупенёв, А.А. Есипов, аспиранты каф. ФЭ

Научный руководитель И.В. Кулинич, м.н.с. ЛИКС, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, Esipand@yandex.ru

Рассматриваются современные тенденции и перспективы развития транзисторов на основе нитрида галлия (GaN) в силовой электронике. Анализируются прогнозы Международной дорожной карты полупроводниковых технологий (IRDS, 2023), тенденции мирового рынка и технологические достижения в области GaN-транзисторов. Отмечаются преимущества GaN-транзисторов, такие как высокая подвижность носителей заряда, высокая эффективность и низкие потери при переключениях, а также обозначаются технологические вызовы, включая термическое управление и интеграцию с CMOS-технологиями. Приведены данные о росте рынка GaN-устройств, подтверждающие коммерческую актуальность данной технологии.

Ключевые слова: GaN, силовая электроника, материалы III–V группы, IRDS.

В последние годы электроника сталкивается с повышенными требованиями к эффективности, надёжности и миниатюризации устройств. В условиях постоянно растущих требований рынка и жесткой конкуренции традиционные кремниевые транзисторы постепенно уступают место новым решениям на основе широкозонных материалов, среди которых особое место занимают транзисторы на основе нитрида галлия (GaN).

Анализ и тенденции развития. Согласно Международной дорожной карте полупроводниковых технологий (IRDS 2023), особое внимание уделяется материалам канала с высокой подвижностью носителей заряда. Прогнозируется более активное внедрение таких материалов, как кремний-германий (SiGe), а затем и материалов III–V группы, таких как GaN и GaAs. Эти материалы обеспечивают более высокую подвижность носителей заряда, что необходимо для дальнейшего повышения скорости работы транзисторов и снижения энергетических потерь [1].

Технология нитрида галлия (GaN) демонстрирует стремительный рост и признание в сфере силовой электроники, благодаря широкозонной структуре материала (ширина запрещённой зоны составляет около 3,4 эВ), обеспечивающей высокую напряженность электрического поля и высокую подвижность электронов ($2000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) [2].

GaN-транзисторы не имеют лавинного пробоя, поскольку устройство разрушается при превышении пороговых значений напряжения. Поэтому они проектируются с большими запасами по напряжению пробоя (обычно на 30% выше номинала). Недавние достижения, такие как производство GaN-чипов на 300-миллиметровых подложках, позволяют значительно снизить себестоимость и расширить применение этой технологии [3, 4].

Отдельного внимания заслуживает развитие вертикальных GaN-транзисторов, которые способны выдерживать значительно более высокие напряжения (до нескольких тысяч вольт), сохраняя при этом компактные размеры и эффективный теплоотвод. Данная технология открывает новые перспективы для применения GaN в силовых преобразователях и устройствах электроснабжения [6].

Представленные прогнозы подтверждаются реальными показателями рынка GaN-транзисторов, который, по оценкам Infineon Technologies (2024), будет расти высокими темпами, увеличившись с 0,4 млрд USD в 2024 г. до 1,2 млрд USD к 2027 г.

Основными драйверами этого роста являются потребительский и автомобильный сегменты, что подчёркивает растущий спрос на эффективные преобразовательные системы в этих отраслях. А также

встраиваемые GaN-компоненты (например, монолитные полумосты и ePower Stage) становятся все более распространёнными и позволяют создавать эффективные системы, особенно в области потребительской электроники и автомобильной промышленности, включая двунаправленные преобразователи 48 В для гибридных автомобилей.

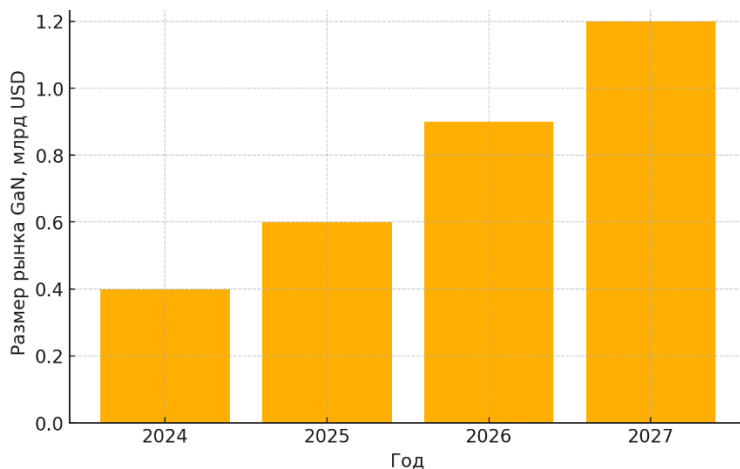


Рис. 1. Прогноз роста мирового рынка GaN-транзисторов [5]

Сложности, которые сегодня стоят перед разработчиками GaN-устройств, включают проблемы термического управления, снижение паразитных ёмкостей и интеграцию GaN-технологий с традиционными кремниевыми технологиями (например, CMOS). Эти задачи активно решаются в рамках международных программ и партнерств, таких как европейская инициатива UltimateGaN [6].

Заключение. Таким образом, силовые GaN-транзисторы являются важной технологической основой для повышения производительности, энергоэффективности и компактности устройств следующего поколения. Перспективы использования GaN-технологий подтверждаются как технологическими прогнозами дорожной карты IRDS, так и рыночными тенденциями на ближайшие годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Международная дорожная карта полупроводниковых технологий (IRDS 2023) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://irds.ieee.org/editions/2023>, свободный (дата обращения: 10.03.2025).
2. Макушкин М. Мощные SiC- И GaN-приборы: перспективы развития // Electronics: science, technology, Business. – 2020. – Vol. 199. – P. 46–58. DOI: 10.22184/1992-4178.2020.199.8.46.58.

3. Лукашин В.М. GaN-полевой транзистор с эффективным теплоотводом на Si-подложке / В.М. Лукашин, А.Б/ Пашковский, И.В. Пашковская // Письма в журнал технической физики. – 2023. – Vol. 49. – Р. 10. DOI: 10.21883/PJTF.2023.02.54278.19327.

4. Infineon Technologies AG [Электронный ресурс]. – <https://www.reuters.com/technology/infineon-targets-large-share-gan-chip-market-after-breakthrough-2024-09-11/>, свободный (дата обращения: 10.03.2025).

5. Анализ размера и доли рынка полупроводниковых устройств GaN – тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/gan-semiconductor-devices-market>, свободный (дата обращения: 10.03.2025).

6. UltimateGaN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ultimategan.eu/work-plan>, свободный (дата обращения: 10.03.2025).

УДК 621.315.5

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБОВ ОТВОДА ТЕПЛА ОТ КАНАЛА ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Т.А. Акулинин, А.А. Есинов, А. Шупенёв, аспиранты каф. ФЭ

Научный руководитель И.В. Кулинич, м.н.с. ЛИКС, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, artemteras@gmail.com

Проведены исследование и оптимизация способов отвода тепла от канала транзистора для снижения температуры полупроводниковых структур. Рассмотрены материалы пассивации с различной теплопроводностью, проведены численное моделирование и эксперименты. Показано, что применение диоксида циркония позволяет снизить температуру в транзисторе на 2–6 градусов по сравнению с традиционными материалами, что повышает надёжность устройств.

Ключевые слова: охлаждение, теплоотвод, оксид циркония, системы охлаждения, материалы пассивации.

Транзисторы AlGaIn/GaN широко применяются в силовой электронике благодаря высокой теплопроводности SiC-подложек [1]. Однако в устройствах GaN-on-Si из-за меньшей теплопроводности подложек проблема теплоотвода обостряется. Высокие плотности мощности (до 30 Вт/мм) в современных транзисторах приводят к значительному локальному нагреву, что влияет на стабильность и срок службы устройств [2]. Для решения этой проблемы применяются материалы пассивации с высокой теплопроводностью, способствующие эффективному отводу тепла. Одним из перспективных материалов является диоксид циркония (ZrO₂), обладающий высокой теплопроводностью и стойкостью к пробую [3, 4].

Описание модели. Для исследования был использован GaN-транзистор в корпусе QFN с теплоотводящим основанием. В структуру модели вошли теплоотводящие стержни из золота и различные материалы пассивации: Si_3N_4 ($\epsilon = 7$), ZrO_2 ($\epsilon = 30$) [4]. Мощность схемы составляла 1 Вт, температура окружающей среды – 50 °С. Конструкция с теплоотводящими стержнями позволила улучшить распределение тепла в структуре. Конструкция стержней представлена на рис. 1.

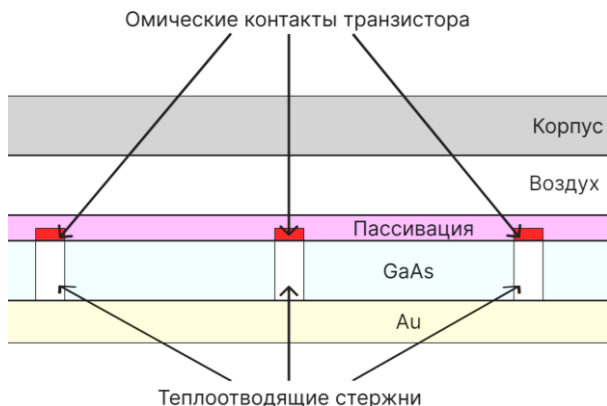


Рис. 1. Схематическое изображение структуры СВЧ ИМС

Исследование модели. На основе исследуемой структуры GaN-транзистора и выбранных условий расчета была построена модель в САПР COMSOL Multiphysics 6.1 (рис. 2).

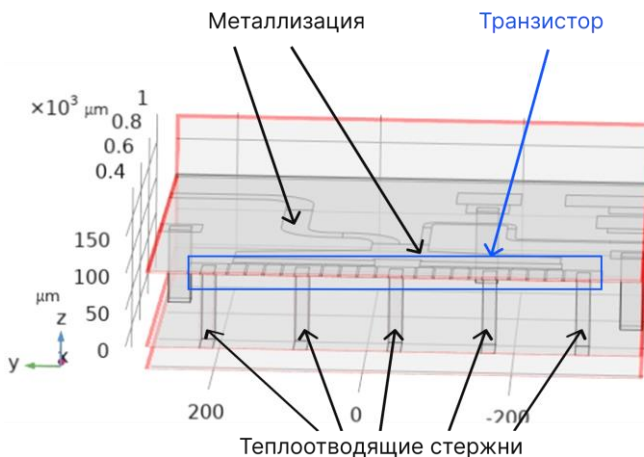


Рис. 2. Изображение структуры исследуемой модели

На рис. 3 представлен результат моделирования распределения тепла в кристалле GaN-СВЧ МИС с пассивирующим слоем на основе плёнки ZrO_2 .

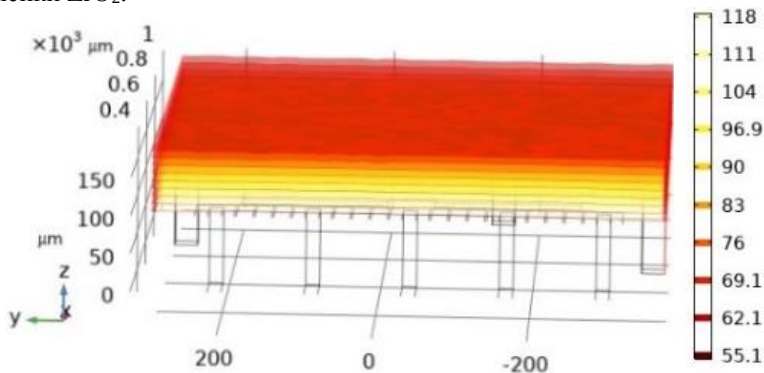


Рис. 3. Изображение с послойным распределением температуры, полученной в результате моделирования со слоем ZrO_2

Таким образом, максимальная температура транзистора с пассивирующим слоем из оксида циркония составляет $118\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На основе разработанной модели, аналогично было проведено исследование влияния различных диэлектрических пленок на температуру в кристалле для GaN МИС.

При использовании Si_3N_4 в качестве материала пассивации GaN МИС максимальная температура в канале составляет $121\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Применение более теплопроводящего диэлектрического материала позволяет снизить максимальную температуру канала на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сравнении с использованием стандартного диэлектрического материала.

Заключение. В данной статье было проведено исследование с использованием численного моделирования в среде COMSOL Multiphysics, чтобы изучить, как материалы для пассивации влияют на отвод тепла от полупроводниковых ИМС.

Диоксид циркония оказался самым эффективным материалом для пассивации с точки зрения отвода тепла. Его температура составила 118° , что позволяет эффективно контролировать тепловыделение в полупроводниковых ИМС.

Нитрид кремния также обеспечивает хороший отвод тепла, но его температура составила 121° . По сравнению с диоксидом циркония нитрид кремния немного уступает в показателях отвода тепла.

Таким образом, исследование позволило выявить диоксид циркония как наиболее эффективный материал для пассивации, обеспечивающий оптимальный отвод тепла от полупроводниковых ИМС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Liang Zhou, Zheng Wei San, Yu-Jie Hua, Liang Lin Investigation on Failure Mechanisms of GaN HEMT Caused by High-Power Microwave (HPM) Pulses 0018-9375 © 2016 IEEE
2. Simulations of diamond heat spreader for the thermal management of GaN-HEMT / Shirui Pua, Wenbo Luob, Yao Shuaic, Chuangui Wud, Wanli Zhanghe // 5th International Conference on Measurement, Instrumentation and Automation. – 2016.
3. Shur M.S. GaN based transistors for high power applications // Solid State Electron. – 1998. – Vol. 42, No. 12. – P. 2131–2138.
4. Hang Zhang Near-junction cooling of gan hemt by capped diamond heat spreader and embedded microchannels. – New Brunswick, New Jersey October, 2022.
5. 30-W/mm GaN-HEMTs by field plate optimization / Y.-F. Wu, A. Saxler, M. Moore, R.P. Smith, S. Sheppard, P.M. Chavarkar, T. Wisleder, U.K. Mishra, P. Parikh // IEEE Electron Device Lett. – Mar. 2004. – Vol. 25. – P. 117–119.

УДК 537.563

КРЕМНИЙ-УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ ИСПАРЕНИЕМ КАРБИДА КРЕМНИЯ В РАЗНЫХ ГАЗАХ

Ф.А. Суховольский, студент каф. ЭП;

Л.Ж. Нгон А Кики, аспирант каф. физики

г. Томск, ТУСУР, spectrumz12@yandex.ru

Научный руководитель В.А. Бурдовицин, проф. каф. физики, д.т.н.

Представлены результаты измерения свойств кремний-углеродных пленок, осажденных электронно-лучевым испарением мишени, спеченной из порошка карбида кремния. Формирование пучка производилось форвакуумным плазменным электронным источником в различных газах: гелий, азот, пропан. У осажденных пленок измерялись оптические и механические свойства, а также состав.

Ключевые слова: электронный источник, электронный пучок, испарение карбида кремния, осаждение покрытий.

Одна из проблем, возникающих при осаждении кремний-углеродных пленок электронно-лучевым испарением карбида кремния, заключается в отличии элементного состава пленок от исходного материала [1]. Цель настоящей работы заключалась в комплексном исследовании соотношения между составом и свойствами кремний-углеродных пленок, а также условиями осаждения. Эксперимент проводился на установке, схематично изображенной на рис. 1. В [1] электроны, эмитируемые газоразрядной плазмой, формировались в пучок

ускоряющим напряжением U_a , а также магнитным полем линзы 2. Электронный пучок 3 разогревал карбид кремния 4, находящийся в графитовом тигле 5. Продукты испарения осаждались на подложках, размещенных в трех подогреваемых держателях 6. Температура подложек контролировалась термопарами 7. Рабочий газ напускался в камеру 8. Испарение проводилось в трех газах: гелий, азот и пропан. В качестве подложек использовались стекло, кварц, кремний и кристаллическая соль NaCl. На осажденных пленках производились измерения спектров пропускания в видимом и ближнем УФ-диапазонах, а также твердости с применением микротвердомера ПМТ-3 и состава с использованием растрового электронного микроскопа TM-1000 с приставкой EDS-SWIFT.

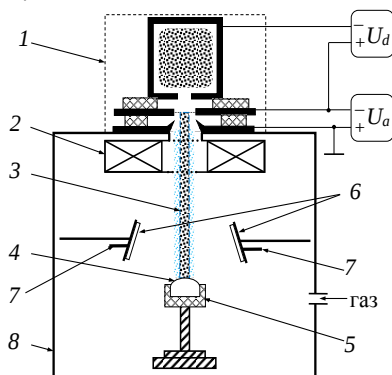


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Результаты эксперимента. Измерения спектров пропускания в видимом диапазоне позволили оценить ширину E_g оптической щели и ее зависимости от температуры осаждения (рис. 2).

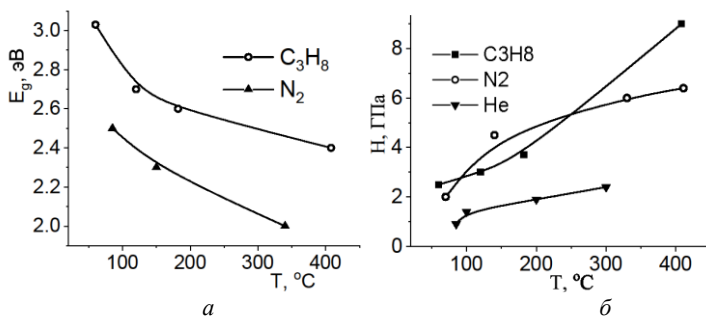


Рис. 2. Ширина E_g оптической щели (а) и твердость H (б) пленок как функция температуры T осаждения

Как можно заметить, во всех газах наблюдается одинаковая тенденция снижения E_g (а) и повышения твердости H (б) с ростом температуры осаждения. Причем наибольшая твердость достигнута при осаждении в пропане. В составе пленок присутствует кислород, содержание которого слабо изменяется с температурой осаждения. Соотношение кремния и углерода Si/C изменяется одинаково в разных газах, а именно Si/C растет с температурой осаждения. Причем в азоте пленка обогащена кремнием, а в пропане – углеродом.

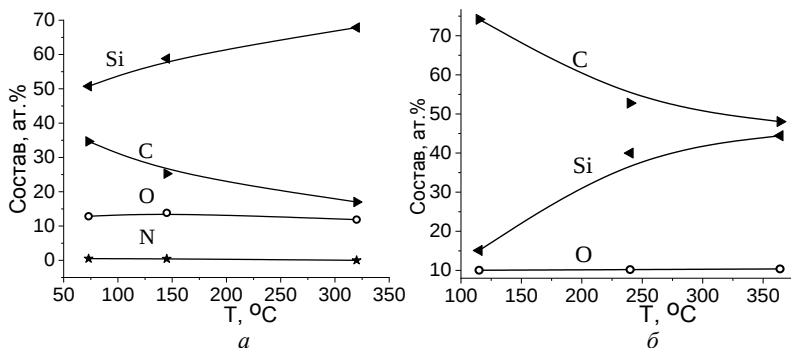
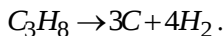


Рис. 3. Состав пленок, осажденных в гелии (а) и пропане (б), как функция температуры T осаждения

Объяснение установленным зависимостям может быть дано на основе представлений об уплотнении структуры пленки при повышении температуры. Это, в первую очередь, относится к повышению твердости. Снижение величины E_g коррелирует с возрастанием доли кремния, в связи с чем есть основания признать этот факт в качестве причины. Избыток углерода в пленках, осажденных в пропане, понятен, поскольку пропан может разлагаться как под непосредственным воздействием электронного пучка, так и в пучковой плазме как результат реакции [2]



Высаживающийся на поверхность растущей пленки углерод создает его избыток. По мере повышения температуры подложки происходит, скорее всего, интенсификация окисления углерода с образованием летучей фазы, что и приводит к снижению содержания углерода.

Выполненные эксперименты указывают на возможность осаждения кремний-углеродных покрытий удовлетворительного качества электронно-лучевым испарением карбида кремния при условии контроля газовой среды.

Работа выполнена за счет гранта РФФИ № 24-29-00392.

ЛИТЕРАТУРА

1. Electrical and optical properties of amorphous silicon carbide thin films prepared by e-beam evaporation at room temperature / J. Zheng, L. Ye, M. He, D. He, Y. Huang, J. Yu, T. Chen /// Journal of Non-Crystalline Solids. – 2022. – Vol. 576. – P. 121233.
2. Plasma-assisted decomposition of gaseous propane to produce CO_x free hydrogen / I. Aleknaviciute, T.G. Karayiannis, M.V. Kollins, C. Xanthos // International Journal of Low Carbon Technologies. – 2013. – Vol. 8. – P. 197–202.

УДК 537.533

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ФОРВАКУУМНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ НА ОСНОВЕ КОНТРАГИРОВАННОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА

А.В. Казаков, с.н.с. каф. физики, к.т.н.;

Н.А. Панченко, доцент каф. физики, к.ф.-м.н.;

А.С. Попова, студентка каф. ЭП; А.В. Тюньков, в.н.с.

лаб. плазменной электроники каф. физики, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, popovaalena700@gmail.com

Показано, что при генерации импульсного пучка электронов форвакуумным плазменным источником электронов на основе контрагированного дугового разряда увеличение давления газа приводит к изменению распределения плотности тока по сечению пучка.

Ключевые слова: импульсный электронный пучок, плазменный источник электронов, форвакуумный диапазон давлений, контрагированный дуговой разряд.

При давлениях 10^{-4} – 10^{-1} Па источники широкоапертурных импульсных электронных пучков с плазменными катодами используются преимущественно для поверхностной обработки проводящих материалов [1]. При давлениях газа 3–30 Па воздействие электронного пучка, генерируемого форвакуумным плазменным источником электронов (ФПИЭ), обеспечивает обработку электрически непроводящих (диэлектрических) материалов [2]. Условия генерации пучка оказывают влияние на его параметры. Тип разряда, используемого в плазменном катоде, тоже оказывает влияние на параметры пучка, а также может влиять на газовые условия в вакуумной камере. В плазменных катодах источников, формирующих пучки электронов при 10^{-4} – 10^{-1} Па, одним из решений последней проблемы является применение контра-

гированного дугового разряда (КДР), использование которого позволяет уменьшить влияние процессов, происходящих в катодной области разряда [1, 3]. Применение КДР в плазменном катode также было реализовано и в ФПИЭ [4]. В настоящей работе исследовано влияние давления газа на формирование электронного пучка в импульсном режиме при его генерации ФПИЭ с плазменным катодом на основе КДР.

Методика проведения эксперимента. Конструкция импульсно-го ФПИЭ с разрядной системой на основе КДР представлена в [4]. Диаметр эмиссионной апертуры в источнике составлял 114 мм. Для исследования формирования импульсного пучка использовался зонд, представляющий собой небольшой цилиндр Фарадея, помещенный в заземленный экран, в котором соосно с цилиндром Фарадея выполнено отверстие радиусом 2,5 мм (рис. 1).

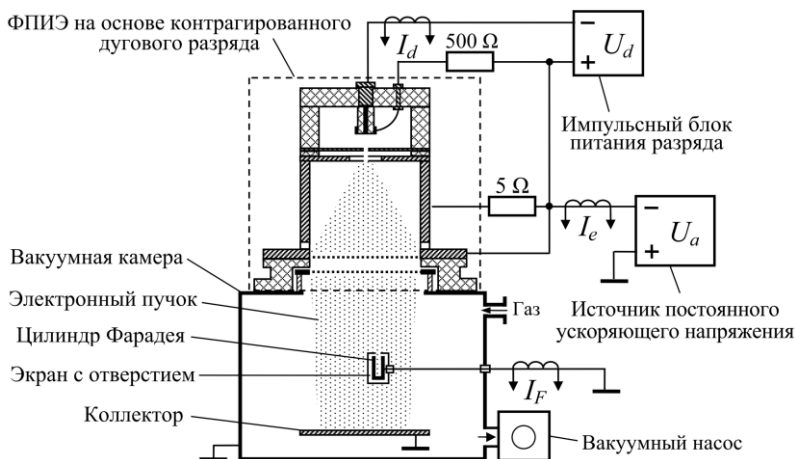


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Зонд устанавливался на расстоянии 10 см от ускоряющего электрода источника (расстояние до плоскости экрана с отверстием) на системе перемещения в вакуумной камере. Токи эмиссии I_e и на цилиндр Фарадея I_F измерялись трансформаторами тока. Исследования проводились при следующих параметрах: ток КДР $I_d = 18$ А при длительности импульсов $\tau_d = 200$ мкс и частоте $\nu = 1$ Гц, ускоряющее напряжение $U_a = 8$ кВ. С помощью систем откачки и напуска газа (N_2) давление регулировалось в диапазоне $p = 8\text{--}12$ Па.

Результаты экспериментов. В ФПИЭ увеличение давления p газа приводит к росту эффективности эмиссии, т.е. увеличению тока I_e

эмиссии при $I_d = \text{const}$, что обусловлено ионным потоком из пучковой плазмы («обратным» ионным потоком) [5]. Для ФПИЭ на основе контрагированного дугового разряда при увеличении p помимо роста тока эмиссии и, соответственно, плотности тока j_e пучка наблюдается существенное изменение профиля распределения пучка. Для сравнения при разном p на рис. 2, *a* построены нормированные распределения плотности тока пучка $j_e/j_{e-\text{max}}$ (радиальная координата r отсчитывалась от оси симметрии). По рис. 2, *a* видно, что при большем p электронный пучок становится шире. Также с ростом давления p сильнее увеличивается скорость нарастания тока I_F на цилиндр Фарадея на периферии пучка (см. рис. 2, *б*). Поскольку расстояние от ускоряющего электрода относительно небольшое, то наблюдаемые зависимости, по-видимому, можно связать с влиянием «обратного» ионного потока, который обеспечивает более быстрое формирование эмиссионной плазмы вблизи эмиссионного электрода источника (т.е. области отбора электронов).

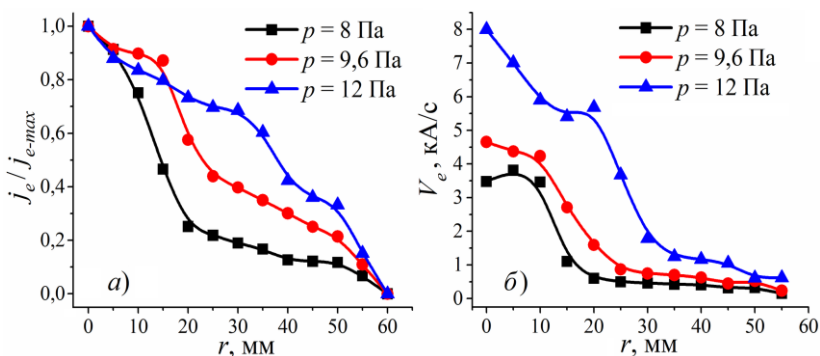


Рис. 2. Нормированные распределения плотности тока пучка (*a*) и зависимости скорости нарастания тока I_F на фронте импульса от радиальной координаты (*б*)

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № FEWM-2023-0012.

ЛИТЕРАТУРА

1. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 216 с.
- 2.. Климов А.С и др. Применение форвакуумных плазменных источников электронов для обработки диэлектриков. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2017. – 186 с.
3. Девятков В.Н. Плазменный сеточный катод на основе контрагированного дугового разряда низкого давления в неоднородном магнитном поле /

В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль // Изв. высш. учеб. завед. Физика. – 2017. – Т. 60, № 10-2. – С. 32–38.

4. Kazakov A.V. Operating regimes of a constricted arc discharge in a forevacuum-pressure, plasma-cathode electron source of pulsed large-radius electron beams / A.V. Kazakov, E.M. Oks, N.A. Panchenko // Physics of Plasmas. – 2022. – Vol. 29. – Art. No. 103108.

5. Emission characteristics of a forevacuum plasma-cathode source of wide-aperture pulsed electron beam with layer (mesh) stabilization of emission plasma / A.V. Kazakov, A.V. Medovnik, E.M. Oks, N.A. Panchenko // Vacuum. – 2024. – Vol. 227. – Art. No. 113428.

УДК 621.315.592

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕРМОЭДС НАНОРАЗМЕРНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК

А.С. Терехова, Л.А. Зеленский, студенты каф. ФЭ

Научный руководитель С.В. Смирнов, проф. каф. ФЭ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, tas18102004@mail.ru

Спроектировано устройство для измерения термоЭДС наноразмерных проводящих пленок с последующей обработкой результатов и определением положения уровня Ферми, концентрации свободных носителей заряда в материале, на основании чего определяется пригодность пленок для их дальнейшего использования.

Ключевые слова: проводящие пленки, ИТО, термоЭДС, уровень Ферми, концентрация носителей заряда.

ТермоЭДС является важнейшей характеристикой металлов и полупроводников. Зная значение термоЭДС, можно вычислить такие его электрофизические характеристики, как положение уровня Ферми и концентрация носителей заряда [1, 2]. Данные параметры необходимы для прогнозирования дальнейшего применения проводящих пленок в электронике.

Устройство, содержащее подвижный термозонд, измеряет термоЭДС наноразмерных проводящих пленок в трех точках, что позволяет повысить точность измерений и представить профиль распределения термоЭДС по поверхности пленки. 3D-модель измерительной части установки представлена на рис. 1.

Движение термозондов производится при помощи шаговых двигателей с винтовой передачей. В драйвере управления используется функция микрошага с делением 1/16, теоретическая точность позиционирования измерительных щупов в этом случае равняется 0,8 мкм.

На рис. 2 представлен внешний вид установки.

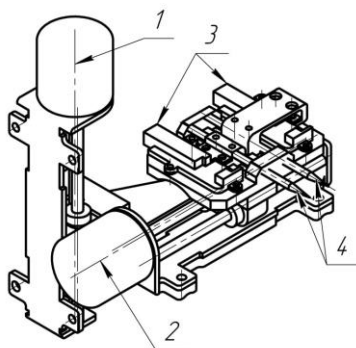


Рис. 1. 3D-модель измерительной части установки: 1 – двигатель оси Y; 2 – двигатель оси X; 3 – двигатели оси Z; 4 – медные электроды

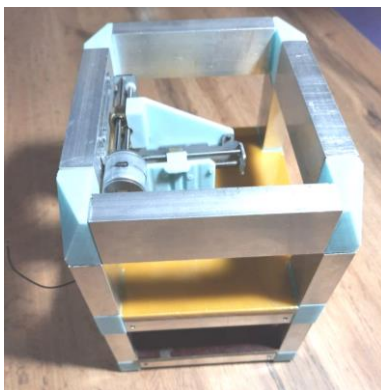


Рис. 21. Внешний вид установки для измерения термоЭДС наноразмерных проводящих пленок

Регистрация напряжения термоЭДС производится 16-битным аналоговым цифровым преобразователем с входным сопротивлением 100 МОм, обработка результатов измерений производится при помощи 8-битного микроконтроллера семейства AVR, ATmega 328p.

Расчет положения уровня Ферми и концентрации носителей заряда производится на ЭВМ с установленным программным обеспечением, реализованным на языке программирования C#.

Спроектированная в ходе выполнения данной работы установка позволяет автоматизировать процесс измерения термоЭДС наноразмерных полупроводниковых и металлических пленок, что может использоваться для контроля их качества и определения пригодности для дальнейшего использования, например в биосенсорах.

Работа выполнена по гранту «Теоретические исследования и экспериментальная разработка оптической приставки для анализа параметров компонентов высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи аналогового и цифрового сигналов».

ЛИТЕРАТУРА

1. Мотт Н. Электронные процессы в некристаллических веществах / Н. Мотт, Э. Дэвис. – М.: Мир, 1974. – 472 с.

2. Парфенов О.Е. О температурной зависимости термоЭДС неупорядоченных полупроводников / О.Е. Парфенов, Ф.А. Шклярчук // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41, вып. 9.

ПОДСЕКЦИЯ 2.4

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Председатель – Семенов В.Д., проф. каф. ПрЭ, к.т.н., с.н.с.;
зам. председателя – Михальченко С.Г., зав. каф. ПрЭ, д.т.н.;
Оскирко В.О., технический директор
ООО «Прикладная электроника», к.т.н.

УДК 620.172.242

АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОКОПРОВОДЯЩЕГО КЛЕЯ НА ПОКРЫТИИ НИКЕЛЬ–ЗОЛОТО

Н.Д. Егорова, студентка каф. ФЭ

Научные руководители: С.В. Смирнов, д.т.н., проф.;

В.В. Дохтуров, главный технолог

г. Томск, АО «НПФ «Микран», egorovanatalia458@gmail.com

Приведены результаты исследования адгезионных свойств клеевого соединения, токопроводящего клея к основанию с покрытием никель–золото.

Ключевые слова: токопроводящий клей, адгезионные свойства, гальваническое покрытие, сушка, постепенный нагрев, испытания, воздействие изменения температуры

В современной микроэлектронике токопроводящие клеи играют ключевую роль, обеспечивая надежный электрический контакт между различными компонентами и материалами. Эти клеи находят широкое применение в полупроводниковых приборах, радиодеталях, микроплатах, конденсаторах и других узлах приборной техники, в качестве замены припоя. Важной характеристикой токопроводящих клеев является их совместимость с различными покрытиями. Рассмотрим возможность использования токопроводящего клея на золотом покрытии [1].

Цель работы: определение возможности использования серебро-содержащего токопроводящего клея для приклейки кристаллов микросхем на золотое покрытие.

Токопроводящие клеи представляют собой адгезивы, содержащие электропроводящие материалы, как правило, на основе серебра с добавлением органической связки [2].

Адгезионные свойства клеевого соединения проверяют методом воздействия усилия на сдвиг кристалла. В качестве системы механического контроля проверки усилия на сдвиг используется установка тестирования микросоединений Nordson 4000.

Для исследования свойств клея были подготовлены образцы, состоящие из медного основания с гальванически осажденными слоями никель–золото толщиной 3 мкм. Предварительная обработка заключалась в обезжиривании образца в парах спирта и последующей сушки. Площадь нанесения клея соответствовала площади кристалла, толщина клеевого слоя 50–70 мкм. Термообработку и сушку клеевого соединения проводили согласно табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Режимы сушки				
№ образцов	Клей	Вид термообработки	Режим термообработки	
			Температура, °С	Время, мин
1	ЕРО-ТЕК Н20Е	Суш. шкаф	125±5	60
2				120
1Б		Стерилизатор	125±5	60
2Б				120

Согласно табл. 1, термообработка образцов 1, 2 производилась в сушильном шкафу, предварительно нагретом до 125±5 °С. Термообработка образцов 1Б–2Б производилась в стерилизаторе, достоинством которого является возможность обеспечить постепенный плавный нагрев до 125±5 °С с последующим охлаждением.

Проведен визуальный контроль качества клеевого соединения с помощью микроскопа.

Согласно требованиям КД, адгезия кристалла к поверхности золотого покрытия считается хорошей, если клеевое соединение выдерживает минимальное усилие на сдвиг более 1,25 кг. Образцы должны демонстрировать равномерное распределение клея на поверхности отрыва: 50% клея должно оставаться на кристалле и 50% – на основании при отслоении.

Результаты представлены в табл. 2.

Анализируя данные табл. 2, можно сделать вывод, что покрытие на основе никель–золота обеспечивает хорошую адгезию с токопроводящим клеем. Все образцы выдержали усилие на сдвиг более 1,25 кг. Образцы, термообработка которых выполнялась в стерилизаторе, имеют лучшие адгезионные свойства в сравнении с образцами в сушильном шкафу (рис. 1).

Т а б л и ц а 2

Результаты исследования прочности клеевых соединений

Способ термообработки	Время термообработки	Температура	Усилие, кг	Вид разрушения
Суш. шкаф	60 мин	125±5 °С	3,03	Кристалл отслоился, клей 50/50
			5,4	Кристалл отслоился, клей 50/50
			7,1	Разрушение кристалла
	120 мин		9,2	Кристалл отслоился, клей 50/50
			10,5	Разрушение кристалла
			10,3	Кристалл отслоился, клей 50/50
Стерилизатор	60 мин		7,2	Разрушение кристалла
			7,1	Разрушение кристалла
			6,8	Разрушение кристалла
	120 мин		13,5	Разрушение кристалла
			12,5	Кристалл отслоился, клей 50/50
			11,3	Кристалл отслоился, клей 50/50

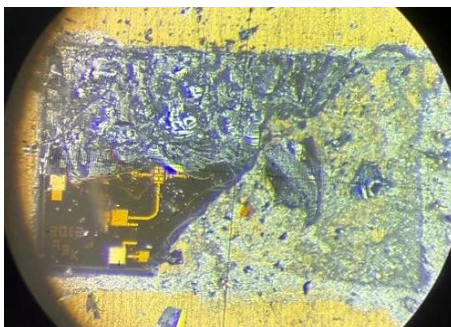


Рис. 1. Характер разрушения образца после испытания на сдвиг

Вывод. При выполнении данной работы установлено, что золотое покрытие имеет хорошую адгезию к серебросодержащим токопроводящим клеям. Все образцы, исследуемые в работе, выдержали усилие на сдвиг более 1,25 кг. Также определено влияние метода термообработки на адгезионные свойства клеевого соединения. Термообработка в стерилизаторе с постепенным нагревом и охлаждением до необходимой температуры обеспечивает лучшее сцепление кристалла к основанию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свойства токопроводящего клея с пониженной температурой отверждения / Н.Ф. Лукина, А.Ю. Исаев, О.А. Стародубцева, О.С. Балабанова // Труды ВИАМ. – 2023. – № 5 (123).
2. Розенберг Л.Д. Материалы для электронной техники. – М.: Энергоатомиздат, 2005.

ПРОВЕРКА УСТОЙЧИВОСТИ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЦИКЛА ИСПЫТАНИЙ

Н.Д. Егорова, студентка каф. ФЭ

Научные руководители: С.В. Смирнов, д.т.н., проф.;

В.В. Дохтуров, главный технолог

г. Томск, АО «НПФ «Микран», egorovanatalia458@gmail.com

Приведены результаты цикла испытаний в условиях изменения температур и ряда механических испытаний для исследования влияния внешних факторов на токопроводящий клей.

Ключевые слова: токопроводящий клей, механические испытания, изменение температур, адгезионные свойства, покрытие, испытание, микросхема, плата микроэлектронная.

Токопроводящие клеи – это адгезивы, содержащие электропроводящие материалы. Они применяются для восстановления проводящих дорожек на печатных платах, ремонта электронных компонентов и создания соединений, где пайка невозможна или затруднена. Основу токопроводящих клеев составляют олигомеры и полимеры, которые сами по себе являются диэлектриками. Для обеспечения электропроводности в клеи добавляют специальные наполнители. Наиболее распространенным наполнителем являются порошки серебра. Серебро обладает высокой пластичностью и устойчивостью к окислению, что позволяет создавать прочные контакты, устойчивые к высоким температурам, влаге и различным компонентам полимерных клеев [1].

Цель работы: определение устойчивости клеевых соединений к воздействию внешних факторов. Контроль клеевых соединений в условиях изменения температур окружающей среды и при механических воздействиях на изделие.

Термоциклы – испытание, включающее в себя выдержку образцов в камере с изменением температуры среды. Испытания позволяют определить предельно возможные эксплуатационные параметры воздействия на изделие [2].

Проводилось исследование клеевого соединения на золотом основании при изменении температуры окружающей среды в диапазоне от –60 до +70 °С. Рассмотрено влияние перепада температур на теплопроводящий клей. В качестве механических испытаний выбран цикл, включающий в себя широкополосную случайную вибрацию (ШСВ), удары (рис. 1).

Качество клеевого шва оценивали визуально под микроскопом на отсутствие трещин, отслоений, также провели оценку адгезионных

свойств методом воздействия усилия на сдвиг кристалла. Микросхема должна выдержать усилие в 1,25 кг (значение усилия рассчитано согласно габаритным размерам кристалла). В качестве системы механического контроля проверки усилия на сдвиг используется установка тестирования микросоединений Nordson 4000. Рассмотрен токопроводящий клей ЕРО-ТЕК Н20Е зарубежного производства [3].

При подготовке к испытаниям клея были проведены следующие шаги:

1. Изготовили образец, на основание приклеили 5 микросхем и плату микрополосковую с использованием токопроводящего клея. Сушку производили 2 ч при температуре 125 °С.
2. Образец поместили в камеру тепла и холода.
3. Установили в камере пониженную температуру (–60 °С). Рекомендуемая скорость изменения температуры в камере 1 °С/мин. Выдержали при этой температуре 1 ч.
4. Повысили температуру в камере до +70 °С со скоростью изменения в камере 2 °С/мин и выдержали образец при этой температуре 1 ч.
5. Выполнили 10 циклов.
6. Извлекли образец из камеры.
7. Выдержали образец в нормальных климатических условиях не менее 48 ч.
8. Провели под микроскопом оценку внешнего вида клея и клеевого шва после воздействия изменений температуры среды.

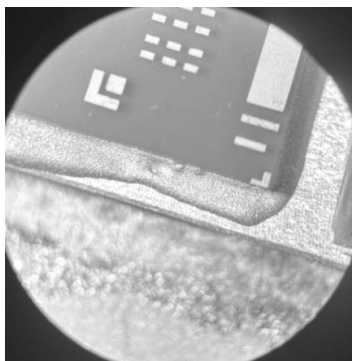


Рис. 1. Внешний вид клеевого шва микрополосковой платы на основании после воздействия изменения температуры среды

При проведении контроля клеевых швов под микроскопом можно сделать вывод, что токопроводящий клей выдержал испытание в условиях изменения температур. Клеевой шов не содержит трещин и отслоений микросхем и микрополосковой платы от золотого основания.

После термоциклов образцы подвергаются ряду механических испытаний, представляющих собой комплекс исследований, направленных на определение механических свойств. Образец должен сохранять качество и свойства клеевого шва при воздействии:

- 1) широкополосной случайной вибрации (ШСВ) по всем осям;
- 2) механического удара одиночного действия с пиковым ударным ускорением 35g с длительностью от 5 до 7 мс;
- 3) механического удара многократного действия с пиковым ударным ускорением 15g по трем осям с длительностью воздействия от 5 до 15 мс. Общее число ударов 600;
- 4) линейных ускорений 30g поочередно в обоих направлениях по осям X, Y, Z. Время воздействия 10 мин;
- 5) акустического шума в диапазоне частот 20–2000 Гц с продолжительностью воздействия 160 с [4].

По окончании циклов испытаний образцы выдержали в нормальных климатических условиях 48 ч. Провели визуальный осмотр через микроскоп и контроль на адгезионные свойства клеевого шва. Результаты исследования представлены в таблице.

**Результаты исследования клеевого шва
после проведения цикла испытаний**

Испытания		Результаты испытания		
Воздействие изменения температуры среды, от –60 до +70 °С	Цикл механических испытаний	Усилие разрушения, кг	Воздействие 1,25 кгс	Результат испытания
		3,45	+	Положительный
		7,03	+	Положительный
		2,25	+	Положительный
		2,11	+	Положительный
		3,98	+	Положительный

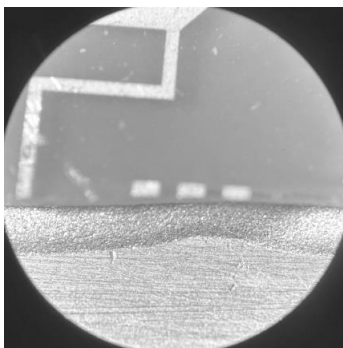


Рис. 2. Внешний вид клеевого шва микрополосковой платы на основании после воздействия цикла испытаний

Результаты испытаний можно считать положительными, исходя из таблицы и рис. 2, так как все микросхемы выдержали усилие более 1,25 кг. При визуальном осмотре клеевого шва микрополосковой платы отслоений клея от основания нет.

Заключение. При выполнении исследования выявлено, что образцы с токопроводящим клеем прошли цикл испытаний, в результате визуального контроля образцов клеевое соединение имеет однородную структуру, не выявлено наличия трещин и отслоений. Также проведен разрушающий контроль адгезионных свойств клеевого шва. При приложении усилия на сдвиг компонента микросхемы, приклеенные на серебросодержащий токопроводящий клей, имеют хорошую адгезию к золотому основанию, выдержали усилие на сдвиг более 1,25 кг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бычков В.В. Основы технологии монтажа радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 2008.
2. Малышев И.Н. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры / И.Н. Малышев, В.И. Гончаров. – М.: Радиотехника, 2016.
3. ОСТ 4Г 0.054.210–83. Склеивание металлических и неметаллических материалов. Типовые технологические операции.
4. ОСТ 11 073.013–2008. Отраслевой стандарт. Микросхемы интегральные и методы испытаний. Методы визуального контроля. – Ч. 4.

УДК 621.3.084.8

СРАВНЕНИЕ АККУМУЛЯТОРОВ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ: ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УМНОЙ РОЗЕТКЕ

В.М. Стяжков, А.А. Инцаки, студенты каф. ПрЭ;

А.В. Кузнецова, студентка каф. РТС

*Научный руководитель В.Н. Башкиров, ст. преп. каф. ПрЭ
г. Томск, ТУСУР*

Сравниваются аккумуляторы и суперконденсаторы, выделяя их ключевые различия: электрохимические реакции и электростатические процессы. Основные параметры: срок службы, температурная стабильность, время заряда. Аккумуляторы применимы для долгосрочного хранения, суперконденсаторы – для кратковременных мощных нагрузок. Отмечены риски перегрева аккумуляторов и их

экологические ограничения. Перспективы использования в умных розетках.

Ключевые слова: аккумуляторы, суперконденсаторы, энергетическая плотность, цикл заряда-разряда, тепловой разгон, гибридные системы.

В настоящее время аккумуляторы и суперконденсаторы являются основными элементами современных систем хранения энергии. Несмотря на общее назначение – накопление и отдача электрической энергии, эти устройства принципиально отличаются по физико-химическим механизмам работы, что определяет их уникальные преимущества и недостатки.

Аккумуляторы хранят электрическую энергию посредством обратимых электрохимических реакций. В литий-ионных аккумуляторах получают энергию вследствие перемещения ионов лития между анодом и катодом. Такие устройства имеют высокую удельную энергию от 150 до 250 Вт·ч/кг, что делает их идеальными для долгосрочного хранения энергии. Например, в электромобилях или портативной электронике.

Суперконденсаторы по своей сути являются конденсаторами с большой емкостью. Они позволяют обеспечить высокую удельную мощность до 10 кВт/кг и быструю скорость заряда и разряда, которая может достигать нескольких секунд. Однако их удельная энергетическая плотность (удельная энергия) значительно ниже – от 5 до 10 Вт·ч/кг, что ограничивает их применение в системах с длительным циклом работы.

Срок службы у данных устройств очень сильно различается. Суперконденсаторы имеют срок службы до миллиона циклов заряда-разряда из-за отсутствия химических реакций. Аккумуляторы, в свою очередь имеют ограниченное количество циклов от 500 до 2000 для литий-ионных аккумуляторов, а также короткий срок службы, большинство современных аккумуляторов теряют свою емкость после 3 лет использования, вследствие чего необходимо производить их замену. Для малогабаритных устройств, таких как умная розетка, которые не нуждаются в долгой автономной работе, это является минусом.

Температура сильно влияет на аккумуляторы, так как химическая реакция замедляется и процессы проходят медленнее. В современных электронных приборах используют схемы для контроля над аккумулятором, чтобы избежать такого эффекта, как тепловой разгон. Суперконденсатор более устойчив к изменениям температуры, и его рабочий диапазон составляет от -40 до $+65$ °С благодаря другим физическим процессам.

Тепловой разгон аккумуляторной батареи – это цепная реакция накопления тепла внутри батареи в процессе зарядки. Возникает, когда выделяемое тепло превышает способность батареи к его отводу.

Последствия теплового разгона – неконтролируемый рост температуры внутри батареи и может привести к выделению горючих газов, что создаёт угрозу безопасности, например взрыва или пожара.

Суперконденсаторы экологически более безопасные, они не содержат легковоспламеняющихся материалов, при их производстве ущерб от влияния на окружающую среду минимальный. Большинство современных аккумуляторов производятся из лития, его добыча и переработка очень токсична для окружающей среды, присутствует возможность самопроизвольного возгорания, и их необходимо утилизировать для уменьшения экологического вреда. Сравнение ключевых параметров устройств представлено в таблице.

Сравнительная таблица ключевых параметров аккумулятора с суперконденсатором

Параметр	Аккумуляторы (Li-ion)	Суперконденсаторы
Энергетическая плотность	150–250 Вт·ч/кг	5–10 Вт·ч/кг
Удельная мощность	0,1–1 кВт/кг	5–10 кВт/кг
Срок службы	500–2000 циклов	>1 000 000 циклов
Время заряда	1–10 ч	1–30 с
Температурный диапазон	–20 до +60 °С	–40 до +65 °С
Стоимость	\$150–200 / кВт·ч	\$500–1000 / кВт

Аккумуляторы и суперконденсаторы часто используются в современных устройствах. Выбор технологии хранения электрической энергии зависит от требований разработчика, заказчика.

Аккумуляторы больше подходят для долгосрочного хранения и высокой энергоёмкости.

Суперконденсаторы – для кратковременных высокоомощных нагрузок и частых циклов заряда-разряда.

Перспективным направлением являются гибридные системы, объединяющие преимущества обоих устройств. Развитие новых материалов и технологий позволит преодолеть текущие ограничения и расширить сферы применения этих накопителей энергии.

Для использования в умных розетках наиболее подходящими являются суперконденсаторы, которые позволяют кратковременно обеспечить устройство электрической энергией для информирования пользователя об отключении входного питания и сгладить импульсы

тока, возникающие при передаче и получении сообщений модемом, что, в свою очередь, уменьшает габариты устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ветров Ю.С. Электрохимические системы хранения энергии / Ю.С. Ветров, С.А. Григорьев. – М.: Энергоатомиздат, 2018. – 320 с.
2. Conway B.E. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications. – New York: Springer, 2013. – 698 p.
3. Goodenough J.B. The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective / J.B. Goodenough, K.S. Park // Journal of the American Chemical Society. – 2013. – Vol. 135, No. 4. – P. 1167–1176.
4. Лукьянов А.А. Суперконденсаторы: теория и практика применения / А.А. Лукьянов, В.М. Петров // Электротехника. – 2020. – № 5. – С. 34–41.
5. Simon P. Materials for Electrochemical Capacitors / P. Simon, Y. Gogotsi // Nature Materials. – 2008. – Vol. 7. – P. 845–854.
6. Zhao J. Review on Supercapacitors: Technologies and Performance Evaluation / J. Zhao, A.F. Burke // Journal of Energy Chemistry. – 2021. – Vol. 59. – P. 276–291.
7. International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 62660-1:2018. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles. – Geneva: IEC, 2018.
8. U.S. Department of Energy. Energy Storage Grand Challenge: Roadmap. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.energy.gov> (дата обращения: 10.11.2023).

УДК 631.674

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОЛИВА НА БАЗЕ ARDUINO «ОАЗИС»

***В.С. Чистяков, А.Р. Низамиева, Н.С. Жукова, студенты ИЯТШ
г. Томск, НИ ТПУ, vsc19@tpu.ru***

В процессе разработки системы автоматического полива на базе Arduino проводились исследования по интеграции различных технических модулей и их настройки для модульного подключения. В результате была создана система, позволяющая осуществлять полив комнатных растений без участия человека.

Ключевые слова: влажность, датчик влажности, растение, полив, Arduino.

Проект системы автоматического полива «Оазис» создан на базе платформы Arduino. Целью разработки являлось создание устройства, позволяющего осуществлять автоматический полив комнатного рас-

тения для упрощения ухода за ним. К разрабатываемой системе были предъявлены следующие требования:

- система должна автоматически осуществлять полив в зависимости от влажности почвы [1, 2];
- устройство должно обеспечивать стабильную работу системы вне зависимости от объема горшка;
- устройство должно оповещать о недостаточном количестве воды в резервуаре;
- устройство автоматического полива должно обеспечивать стабильную работу системы в корпусе с габаритами 10×10 см в условиях повышенной влажности, изменяющейся температуры.

Элементный состав аппаратной части разработанной системы включает в себя контроллер ArduinoUNOR3, оснащенный микроконтроллером ATmega328P, емкостный датчик влажности, модуль твердотельного одноканального реле SolidStateRelay-5V-1, датчик уровня воды и насос-помпу.

Алгоритм работы системы заключается в следующем:

- 1) устройство измеряет влажность почвы, если влажность ниже нормы, то измеряется уровень воды в резервуаре;
- 2) если уровень воды недостаточный, то система оповещает об этом, и пользователю необходимо заполнить резервуар;
- 3) если уровень воды позволяет осуществить полив, то система автоматически поливает растение;
- 4) спустя 15 минут датчик проверяет уровень влажности, если он остался ниже нормы, то полив осуществляется еще раз.

В качестве источника питания насоса используются три ААбатареи, для питания платы используется адаптер 5V.

Схема электрическая принципиальная приведена на рис. 1.

В рамках экспериментальной проверки работоспособности системы было проведено несколько опытов, которые показали, что:

- система работает одинаково корректно для различных объемов горшков;
- устройство работает корректно в корпусе при изменяющихся условиях эксплуатации;
- система работает одинаково корректно при изменении влажности почвы;
- система работает корректно при недостаточном уровне воды, уведомляет пользователя о возникшей проблеме.

АВТОНАСТРОЙКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ю.Ф. Савчук, М.М. Поддубный, магистранты каф. ПрЭ
Научный руководитель В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, ikolt456@gmail.com

Рассматриваются методы автонастройки ПИД-регулятора и его прогнозирования, а также их математическое и аппаратное представление для систем управления бесколлекторных двигателей.

Ключевые слова: рекуррентный метод наименьших квадратов, ПИД-регулятор, методы автонастройки, следящие системы, автокоррекция.

Целью данной работы является рассмотрение методов, позволяющих автоматизировать настройку систем управления электродвигателей и подстраивать параметры во время работы.

Бесколлекторные двигатели постоянного тока (BLDC) – основа современных энергоэффективных систем: от электромобилей до промышленных роботов. Однако их эффективная работа требует точной настройки параметров управления, что вручную занимает часы и зависит от внешних условий (температура, нагрузка). Алгоритмы автонастройки решают эту проблему, автоматически адаптируя коэффициенты PID, электрические параметры и компенсируя нелинейности. Энергопотери при неоптимальной подстройке составляют около 20%, что при среднем КПД в 80% уже значительно [1].

Также при замене электродвигателя может понадобиться повторная настройка. Для того чтобы избежать этого, существуют различные методы автонастройки. Параметры, которые нужно подстраивать в ПИД-регуляторе, – это пропорциональный, интегральный, дифференциальный коэффициенты. Также изменяются электрические параметры двигателя, такие как сопротивление обмоток, которое измеряется при заблокированном роторе через подачу постоянного напряжения и анализ установившегося тока, индуктивность, определяется током нарастания, и коэффициент ЭДС, рассчитывается при вращении двигателя без нагрузки. При ручной настройке также сталкиваются с трением, люфтами и задержками в драйверах, которые искажают управляющие сигналы, что увеличивает время настройки. Чтобы скомпенсировать проблемы ручной настройки, вводят искусственную задержку в ШИМ-сигналы. Температурную коррекцию проводят для датчи-

ков термисторов и корректируют сопротивление обмоток и коэффициент ЭДС.

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T),$$

где α – температурный коэффициент меди ($0,004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Также система должна адаптироваться к разным режимам работы (пуск, торможение, переменная нагрузка).

Существует два алгоритма настройки – частотный и рекуррентный метод наименьших квадратов (МНК) [2]. В дополнение существуют методы интеграции нейросетевых алгоритмов для предсказания параметров [3]. Частотный алгоритм реализуется с помощью генерации синусоидального ШИМ-сигнала, после замера амплитуды и фазы вычисляются критическая точка и устойчивость системы. После анализа устойчивости происходит расчёт ПИД-коэффициентов по методу Циглера–Никольса. Адаптивный алгоритм МНК не требует остановки системы и учитывает изменение нагрузки и температуры в реальном времени. При комбинации алгоритмов возможно быстро настроить систему на старте системы и адаптировать параметры в процессе работы. МНК – это рекуррентный метод, который минимизирует сумму квадрата ошибок между предсказанными и реальными значениями входного сигнала.

Модель рекуррентной системы:

$$y_k = \varphi_k^T \cdot \theta + \varepsilon_k,$$

где y_k – измеренный выход системы на одном шаге k ; φ_k – вектор регрессоров (входные данные, ошибка и её интеграл/производная); θ – вектор оцениваемых ПИД-коэффициентов; ε_k – шум измерения.

В отличие от частотного алгоритма обновляет оценки параметров на каждом шаге данных по формуле

$$\begin{aligned} \theta_{k+1} &= \theta_k + P_k \cdot \varphi_k \frac{(y_k - \varphi_k^T \cdot \theta_k)}{1 + \varphi_k^T \cdot P_k \cdot \varphi_k}, \\ P_{k+1} &= \frac{1}{\lambda} \left(P_k - \frac{P_k \cdot \varphi_k \cdot \varphi_k^T}{1 + \varphi_k^T \cdot P_k \cdot \varphi_k} \right), \end{aligned}$$

где P_k – ковариационная матрица; λ – коэффициент забывания ($0 < \lambda \leq 10$), который определяет, как быстро алгоритм «забывает» старые данные.

Ковариационная матрица P_k в рекуррентном методе наименьших квадратов – это симметричная положительно определенная матрица,

которая хранит информацию о неопределенности оценки параметров K_p , K_i , K_d .

Внедрение методов автонастройки в системы управления ощути-мо сокращает время ручной калибровки (на 70–90%) и снижает энергопотери на 15–20%, повышая надёжность электроприводов в условиях переменной нагрузки и температурных колебаний. В перспективе подобные системы будут всё чаще внедряться в блоки управления электроприводами, уменьшая время разработки и производственной настройки. Также можно отметить перспективные направления развития систем автонастройки: интеграция искусственного интеллекта для прогнозирования параметров и бездатчиковое управление. Дальнейшие исследования в этой области будут направлены на создание универсальных решений, сочетающих адаптивные алгоритмы с предиктивной аналитикой [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Kim T. Position sensorless brushless DC motor/generatordrives: review and future trends / T. Kim, H.-W. Lee, M. Ehsani // IET Electr. Power. Appl. – 2007. – No. 1 (4). – P. 557–564.
2. Åström K.J. PID-Controllers: Theory, Design, and Tuning. – 1995.
3. Режим доступа: https://www.st.com/resource/en/user_manual/um3259-stm32-motor-control-sdk--6step-firmware-sensorless-parameter-optimization-stmicroelectronics.pdf, свободный (дата обращения: 14.03.2025).
4. Nikkitha K. An Efficient Machine Learning Method for Inter-Turn Fault Detection and Torque Control in Bldc Motor / K. Nikkitha, E. Sowmya, E. Parimala, S. Banumathi // 2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE). – 2022. – P. 1012–1016.

УДК 621.316

УМНЫЙ ДОМ НА ARDUINO

***Ф.С. Серов, М.А. Пашков, А.С. Поволоцкий, С.С. Березовский,
Н.Е. Юнгблут, Л.В. Жданов, Д.В. Федотов, студенты ИЯТШ
г. Томск, НИ ТПУ, fss3@tpu.ru***

Представлена система «Умный дом» на базе Arduino, в основе конструкции которой лежит совокупность средств контроля и измерения: высокоточный датчик температуры и влажности, датчик движения. В результате была создана схема, позволяющая эффективно управлять домашними устройствами и осуществлять мониторинг параметров окружающей среды.

Ключевые слова: Arduino, температура, влажность, датчик, плата, Wi-Fi-модуль.

Целью разработки являлось улучшение качества среды, окружающей человека, путем повышения уровня автоматизации его домашнего пространства. Для этого была разработана система контроля и информирования, базирующаяся на датчиках измерения температуры и влажности в помещении, а также лампе для подсветки помещения в темное время суток. Включение подсветки осуществляется по срабатыванию датчика движения, что свидетельствует о наличии движущегося объекта (человека) в зоне действия умного дома. К разрабатываемой системе были предъявлены следующие требования:

- возможность вывода на экран текущих измеренных значений температуры и влажности;
- включение освещения при обнаружении движущегося объекта;
- возможность удаленного управления по Wi-Fi;
- независимость работы элементов системы (т.е. при отсутствии одного из модулей, например, датчика движения, система должна продолжать функционировать, исключая его из процесса мониторинга).

Элементный состав системы включает в себя датчик DHT22, датчик HC-SR501, дисплей LCD, фоторезистор, Wi-Fi-модуль ESP8266, светодиоды.

Система обеспечивает автоматическое управление освещением на основе обнаружения движения и уровня освещенности, а также предоставляет информацию о температуре и влажности в реальном времени.

В качестве источника питания используется 9V adapter, подключенный к плате через DC-DC-преобразователь.

Схема электрическая принципиальная приведена на рис. 1.

В автоматическом режиме устройство отслеживает уровень освещенности в помещении и меняет сопротивление на фоторезисторе, что приводит к изменению яркости светодиодов. В ручном режиме потребитель сам может изменить яркость светодиодов, поменяв сопротивления на резисторе при помощи регулятора. Измерение и вывод на дисплей температуры и влажности воздуха не зависят от выбранного режима и производятся всегда.

В рамках экспериментальной работы были проведены несколько опытов, которые показали, что:

- система измеряет температуру и влажность с погрешностью, не превышающей 2%;
- система успешно передает данные о температуре и влажности на дисплей;
- система успешно обновляет данные в реальном времени.

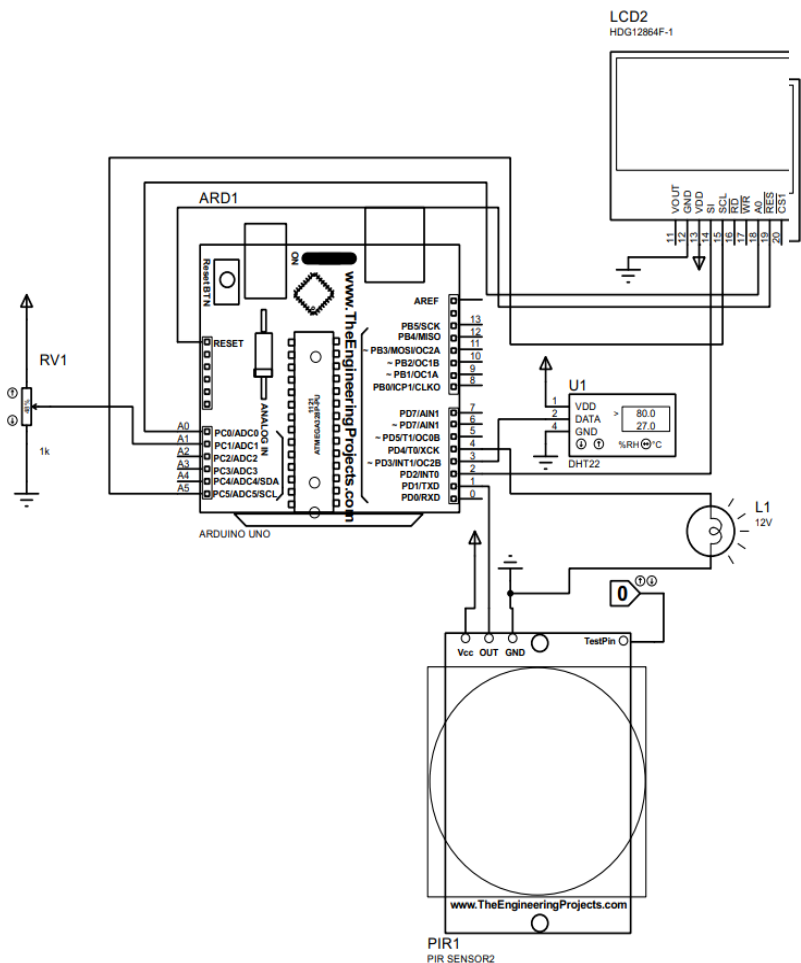


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная внешнего модуля системы умного дома

ЛИТЕРАТУРА

1. Яманур С. Raspberry Pi Pico в любительских проектах. Создание интересных проектов для домашней автоматизации, заботы о здоровье, садоводства и гражданской науки / С Яманур, Ш. Яманур; пер. с англ. Ю.В. Ревича. – М.: ДМК-Пресс, 2023. – 282 с. [Электронный ресурс]. – URL: <https://static.insales-cdn.com/files/1/4766/26038942/original/978-5-93700-165-8.pdf>
2. Барретт С.Ф. Arduino: искусственный интеллект и машинное обучение / пер. с англ. Ю.В. Ревича. – М.: ДМК-Пресс, 2024. – 242 с. [Электронный ресурс]. – URL: [<https://reader.lanbook.com/book/456722#1>]

ПОДСЕКЦИЯ 2.5

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАНОФОТОНИКА И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

*Председатель – Перин А.С., директор передовой инженерной
школы «Электронное приборостроение и системы связи»
им. А.В. Кобзева, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.;
зам. председателя – Долгирев В., ассистент каф. СВЧиКР,
инженер ЛФИС*

УДК 535.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОННОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ЗАДАЧ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА НА БОКОВЫХ ЧАСТОТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Ф.М. Гончаров, м.н.с.; А.Е. Ефимов, программист

*Научный руководитель Ф.Д. Киселев, директор по продукту, к.ф.-м.н.
г. Санкт-Петербург, ООО «КвантКАД», fedor_goncharov@mail.ru*

Представлены результаты численного моделирования фотонного интегрального оптического фильтра на уровне схемотехнического моделирования в отечественном программном обеспечении «КвантКАД», удовлетворяющего требованиям квантового распределения ключа на боковых частотах. Рассмотрен фильтр на основе микрокольцевого резонатора, а также каскада микрокольцевых резонаторов. Проведено моделирование работы фильтра в упрощенной системе квантового распределения ключа на боковых частотах.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, микрокольцевой резонатор, спектральный фильтр, квантовое распределение ключа на боковых частотах.

Квантовое распределение ключа (КРК) на боковых частотах (БЧ) представляет собой перспективное направление в развитии квантовых коммуникаций [1]. Внедрение КРК в фотонно-интегральные схемы (ФИС) открывает новые возможности для телекоммуникационных технологий благодаря их компактности, стабильности и способности к масштабированию [2]. Однако для реализации КРК на ФИС необходимо решить задачу интеграции волоконных компонентов на чип. В

частности, одной из главных проблем КРК БЧ остается отсутствие интегрального фильтра с узкой полосой пропускания и высокой степенью подавления внеполосных сигналов.

Целью настоящей работы является проектирование фотонного интегрального фильтра, соответствующего требованиям интегральной реализации протокола КРК БЧ.

КРК БЧ накладывает определенные строгие требования к спектральному фильтру, а именно: полоса фильтрации должна быть порядка 10 ГГц, глубина фильтрации – не менее 30 дБ, потери для боковых частот должны быть минимизированы. Кроме того, для мониторинга мощности, необходимой в том числе для дополнительных мер защиты от атак на техническую реализацию, полезным свойством фильтра является возможность отведения центральной отфильтрованной частоты в отдельный канал. Кроме того, это потенциально полезно для реализации альтернативного протокола КРК БЧ на непрерывных переменных.

В рамках моделирования фильтра была выбрана платформа кремния на изоляторе со стандартными размерами сечения 500 на 220 нм, произведен расчет эффективного показателя преломления. Данный параметр был применен в моделировании одного кольца на схемотехническом уровне (рис. 1, *а*). Спектр пропускания представлен на рис. 2, *а*. Результаты моделирования удовлетворяют минимальным требованиям, однако резонансная частота является крайне чувствительной к минимальным изменениям параметров кольца. Кроме того, боковые частоты испытывают достаточно большие потери из-за пологого профиля фильтрации.

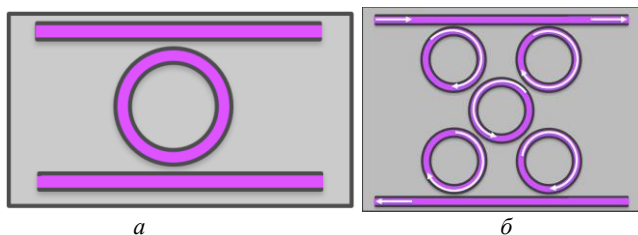


Рис. 1. Фотонный интегральный фильтр на основе:
а – одного кольца, *б* – каскада из 5 колец

Таким образом, спектральный фильтр из одного кольца был заменен каскадной структурой, как показано на рис. 1, *б*. Такая архитектура из 5 колец позволила создавать фильтр с более крутым спадом в частотной области (рис. 2, *б*), что снизило потери на боковых частотах.

тах. Кроме того, также возросла и глубина фильтрации, а резонансная частота стала более устойчивой к отклонениям от проектных параметров.

Далее была смоделирована принципиальная схема КРК БЧ, состоящая из лазера, первого фазового модулятора, создающего боковые частоты, а также второго фазового модулятора на стороне получателя, и спектрального фильтра как с одним кольцом, так и с каскадом. В результате было подтверждено, что данные фильтры отсекают центральную частоту в отдельный канал, тогда как боковые частоты пропускаются.

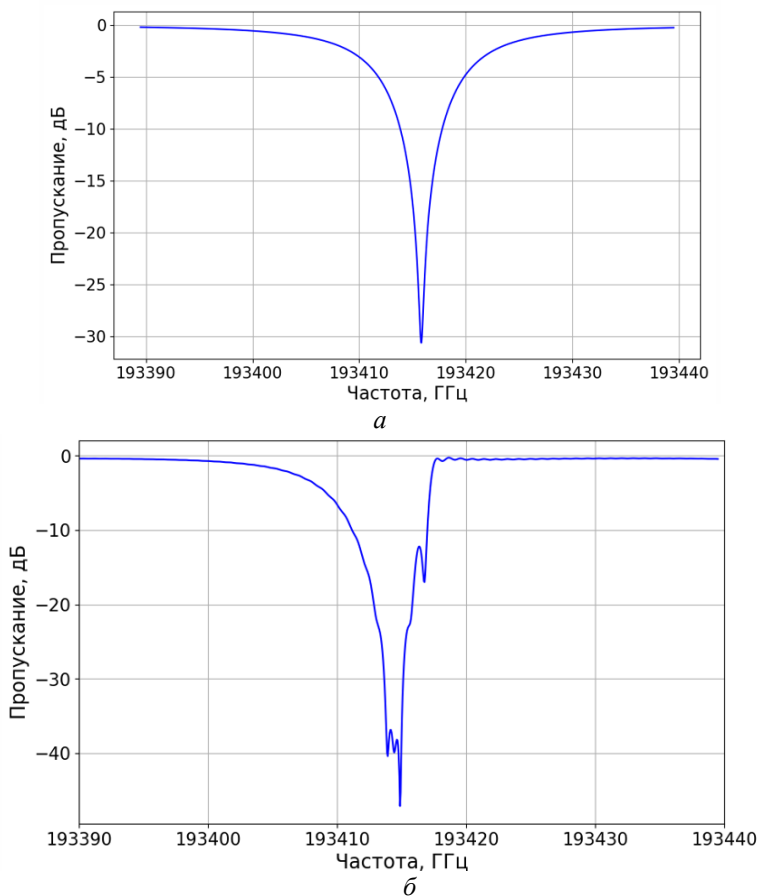


Рис. 2. Спектр пропускания фильтра на основе:
 a – одного кольца, b – каскада из 5 колец

Подводя итог, в данной работе была предложена архитектура интегрального оптического фильтра из 5 колец, удовлетворяющего требованиям КРК БЧ, что было продемонстрировано при моделировании на схемотехническом уровне как для фильтра, так и для системы КРК БЧ в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pirandola S. et al. Advances in quantum cryptography // Advances in optics and photonics. – 2020. – Vol. 12, No. 4. – P. 1012–1236.
2. Liu Q. et al. Advances in chip-based quantum key distribution // Entropy. – 2022. – Vol. 24, No. 10. – P. 1334.

УДК 544.52

ФОТОГЕНЕРАЦИЯ КИСЛОТЫ ПРОИЗВОДНЫМИ БЕНЗОТИОФЕНА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ 3-Й ГАРМОНИКОЙ ND:YAG-ЛАЗЕРА

Н.В. Измайлова, аспирант каф. КЭиФ РФФ НИ ТГУ;

Л.Г. Самсонова, с.н.с. ЛАТИБ ТУСУРа;

Р.М. Гадиров, зав. лаб. ЛАТИБ ТУСУРа

Госзадание № FEWM-2024-0001. Пористые мембраны для задач молекулярной биологии и синтез на их основе олигонуклеотидов г. Томск, ТУСУР, izmailova.sfti@gmail.com

Методами УФ-спектроскопии проведено исследование фотохимической активности в толуольных растворах бензотиофен-производных с разными кислотными заместителями. В результате лазерного фотолиза образовывалась кислота, регистрация которой осуществлялась появлением в спектрах поглощения и флуоресценции протонированной формы индикатора. Выполнена оценка квантовой эффективности фотогенерации кислот.

Ключевые слова: фотогенераторы кислот, лазерный фотолиз, синтез олигонуклеотидов.

Непрямое фотоснятие защиты с использованием фотогенерированной кислоты для удаления кислотолабильных блокирующих групп – реакция 5'-детритилирования, применяется в синтезе олигонуклеотидов. Поиск фотогенераторов кислот (ФГК), которые были бы эффективны в реакции фотонаправленного синтеза, является актуальной задачей [1].

В настоящей работе исследованы соединения, синтезированные в Институте органического синтеза им. И.Я. Постовского, по тексту обозначенные шифром X, Y, Z. Между собой соединения отличаются заместителями бензотиофенового фрагмента (рис. 1).

Целью работы являлось обнаружение фотогенерации кислоты соединениями X, Y, Z в неводных растворах при возбуждении лазерным излучением. Кроме того, ожидалось, что генераторы фотокислот, которые действуют посредством внутримолекулярной перегруппировки, снизят риск модификации свободных радикалов свежеразблокированных олигонуклеотидных 5'-ОН-групп.

Толуольные растворы исследуемых соединений дробно облучались 3-й гармоникой Nd:YAG-лазера (355 нм) с последующей регистрацией спектров поглощения и флуоресценции. Регистрация образовавшейся кислоты происходила с помощью индикатора (In), в качестве которого использовано соединение 4,6-Бис(5-(9-этил-9H-карбазол-3-ил) тиофен-2-ил) пиримидина (см. рис. 1).

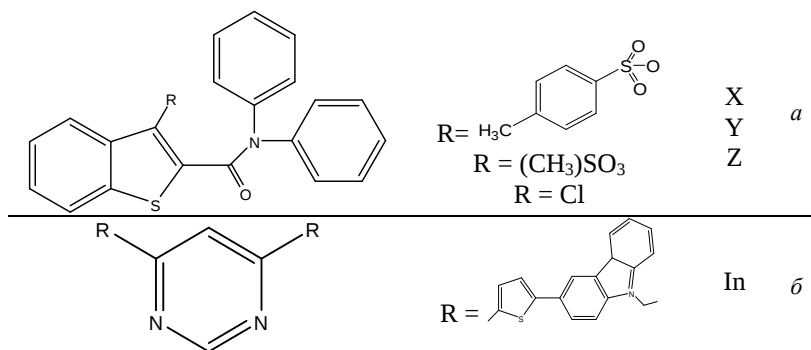


Рис. 1. Химические формулы: исследуемых соединений – а; индикатора кислоты – б

В кислых средах это соединение протонируется по одному из атомов азота пиримидинового кольца, его протонированная форма поглощает свет в красной области, окрашивая раствор в малиновый цвет. Следует отметить, что в случае соединения Z (с Cl-кислотным остатком) не наблюдалась реакция на In.

По изменению концентрации соединений в процессе фотолиза и поглощенной энергии [2] определен квантовый выход γ фотораспада соединений (таблица). Значения его одного порядка – $\sim 10^{-2}$, но для соединения Z – в три раза ниже.

Спектральные характеристики в толуоле
и квантовый выход фотораспада исследуемых соединений

Соединение	$\lambda_{\text{погл}}, \text{нм}$	$\lambda_{\text{фл}}, \text{нм}$	γ
X	304	396–407	0,072
Y	305	395–409	0,06
Z	297	395–407	0,024

ЛИТЕРАТУРА

1. Шелковников В.В., Лоскутов В.А. и др. // Изв. Академии наук. – Сер.: химическая. – 2011. – № 3. – С. 548–556.
2. Кузнецова Н.А. и др. // Успехи химии. – 2020. – № 2. – С. 173–190.

УДК 621.375.826

ИЗМЕНЕНИЕ ПОРОГА ОПТИЧЕСКОГО ПРОБОЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КРИСТАЛЛОВ ZnGeP_2 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

***А.Ю. Кальсин, Е.С. Слюнько, С.Н. Подзывалов,
А.Б. Лысенко, аспиранты НИ ТГУ;***

***Н.Н. Юдин, дир. НОЦ «Оптические и фотонные технологии»
г. Томск, НИ ТГУ, andrejkalsin@gmail.com***

Исследовано влияние плазменной очистки поверхности на оптическую стойкость монокристаллического ZnGeP_2 . Определены оптимальные параметры ионного заряда. При обработке низкотемпературной плазмой (концентрация электронов 10^{14} – 10^{15} см $^{-3}$) стойкость к лазерному воздействию увеличилась на 30%.

Ключевые слова: оптический пробой, ZnGeP_2 , параметрические генераторы света.

ZnGeP_2 – материал нелинейной оптики, обладающий множеством уникальных свойств и широко использующийся для генерации второй гармоники и параметрического усиления [1]. Благодаря этим качествам ZnGeP_2 является перспективным материалом для создания высокоэффективных параметрических генераторов света в среднем ИК-диапазоне. На его основе были разработаны мощные источники перестраиваемого когерентного излучения.

Основная проблема, ограничивающая дальнейшее повышение энергетических характеристик параметрических генераторов света на основе ZnGeP_2 , связана с эффектом оптического пробоя. Различные методы обработки поверхности кристаллов могут снижать стойкость материала к лазерному излучению [2]. Так, при полировке использование абразива вызывает механические повреждения поверхности. Глубина возникающих трещин превышает размер зерен абразива и составляет порядка нескольких микрон. Также на полированной поверхности наблюдаются неровности, которые включают скопления остатков самого материала, так и веществ, используемых при его обработке. Для повышения оптической стойкости материала используются различные методы удаления поверхностных загрязнений: лазер-

ная закалка, химическое травление, ионно-лучевое травление, травление поверхности плазмой.

Целью данного исследования являлось изучение влияния плазменной обработки поверхности монокристаллического ZnGeP_2 на его оптическую стойкость и определение оптимальных параметров обработки для повышения порога оптического пробоя.

Для эксперимента было отполировано 6 пластин монокристаллического ZnGeP_2 диаметром 50 мм и толщиной 2 мм. После чего поверхность образцов подверглась плазменной обработке импульсным разрядом с количеством импульсов от 1000 до 500 000 для установления оптимальных параметров (таблица).

Параметры ионного разряда

№	Частота, Гц	Число импульсов
1	100	10 000
2	50	10 000
3	100	100 000
4	50	100 000
5	100	500 000
6	50	500 000

Порог оптического пробоя измерялся с использованием Ho:YAG-лазера (максимальная мощность 15 Вт, длительность импульса 26 нс) методом «R-on-1». Профиль поверхностей образцов до и после обработки был измерен с помощью оптического профилометра MicroXAM-800. Результаты показали, что наиболее информативным параметром шероховатости является S_z (максимальная высота рельефа поверхности), так как параметры S_a и S_q меняются незначительно. Плазменная очистка всегда приводила к увеличению параметра S_z , что указывает на испарение загрязняющего материала из поверхностного слоя. Однако наблюдается уменьшение S_z при увеличении количества импульсов, из-за более тщательной очистки и плавления трещиноватого слоя. Для образцов 1–4 наблюдалось незначительное увеличение порога оптического пробоя. Для образцов 5 и 6 было достигнуто увеличение оптической стойкости на 30% по сравнению с исходными значениями. Это объясняется более тщательной очисткой поверхности при увеличении времени воздействия плазмы.

Заключение. Разработанная методика плазменной очистки позволяет повысить оптическую стойкость ZnGeP_2 за счет уменьшения толщины нарушенного приповерхностного слоя. Требуется дальнейшее исследование для оптимизации режимов воздействия на поверхность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Высокоэффективная пикосекундная параметрическая суперлюминесценция в кристалле ZnGeP_2 в диапазоне 5–6,3 мкм / К.Л. Водопьянов, В.Г. Воеводин, А.И. Грибенюков, Л.А. Кулевский // Квантовая электроника. – 1987. – Т. 14, № 9. – С. 1815–1819.
2. Влияние технологии постростовой обработки и параметров лазерного излучения на длинах волн 2091 и 1064 нм на порог оптического пробоя монокристалла ZnGeP_2 / Н.Н. Юдин, О.Л. Антипов, А.И. Грибенюков, И.Д. Еранов, С.Н. Подзывалов, М.М. Зиновьев, Л.А. Воронин, Е.В. Журавлева, М.П. Зыкова // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51, № 4. – С. 306–316.

УДК 535.555

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРОВ ЗЕРЕН НИОБАТА ЛИТИЯ И ИХ ОРИЕНТАЦИИ НА ОПТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

В.И. Крутов, аспирант каф. ФЭ

Научный руководитель И.В. Кулинич, с.н.с. ЛФИС, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, vladimir.i.krutov@tusur.ru

Представлены результаты исследования математической модели, выполненной в среде математического моделирования «COMSOL Multiphysics» методом конечных элементов, по влиянию соотношения у-ориентированных зерен к общему количеству и размера зерен на оптические потери волноводных структур через параметр S21.

Ключевые слова: ниобат лития, поликристаллический волновод, оптические потери, математическое моделирование.

Фотоника – одна из современных областей наук, направленная на работу с оптическими сигналами и приборами, соразмерными ширине оптического пучка. Одним из материалов, получивших широкое распространение в фотонике за счет своих сегнетоэлектрических и не только свойств, является ниобат лития (LiNbO_3). На настоящий момент получил использование монокристаллический ниобат лития, получаемый методом «smart cut», однако данный метод крайне дорогой для широкого применения. Для возможности массового использования и уменьшения цены производства активно исследуется возможность создания поликристаллических пленок ниобата лития методом со свойствами, схожими с монокристаллом [1].

Одной из основных проблем поликристаллического покрытия является разносторонняя направленность кристаллических решеток зерен, что влияет на анизотропность физических свойств покрытия. Та-

ким образом, при моделировании поликристаллических элементов требуется учитывать «паразитные фазы» к требуемой [2, 3].

Работа проводилась в программном пакете «COMSOL Multiphysics» методом конечных элементов, в рамках чего рассматривалось влияние поликристаллической волноводной структуры в сравнении с цельной за счет задания волновода как плотно прижатых правильных шестиугольных призм, каждой из которых за счет использования аномального коэффициента преломления было задано одно из трех кристаллических направлений: по осям x , z или y (основное направление, востребованное в фотонике). Таким образом, было смоделировано разнообразие направлений кристаллической решетки и исследовано влияние соотношения количества зерен, направленных в y -направлении, к тем, что направлены иначе для нескольких размеров зерен (сторона грани шестиугольной призмы) для длины волны 1550 нм, которая широко используется в области телекоммуникаций.

Первым шагом исследования было определение оптимальных геометрических размеров волновода длиной в 5 зерен. Целью расчета данных параметров было упрощение модели с учетом необходимой точности. Для дальнейшего использования моделей с разным размером зерен использовались значения из табл. 1.

Результаты исследования параметра S_{21} представлены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 1

Параметры S_{21} в зависимости от количества зерен, направленных по оси y , и размера зерен

Параметры, нм	Размер зерен, нм		
	20	25	30
Ширина волновода	1 560	1 500	1 530
Ширина обкладок волновода	3 460	3 600	3 230
Высота волновода	750	1 500	900
Высота верхней обкладки волновода	2 000	2 300	2 500
Высота нижней обкладки волновода	1 300	900	1 300

Таблица 2

Результаты измерения параметра S_{21} в зависимости от количества зерен, направленных по оси y , и размера зерен

% зерен y -направления	Размер зерен, нм		
	20	25	30
67	20,1644	9,8777	34,7570
83	35,5128	13,1380	10,5246
90	25,3142	10,0527	10,0393
93	11,4656	6,0706	9,9450
96	3,3138	8,7872	2,0278
100	0,1921	0,0816	0,0047

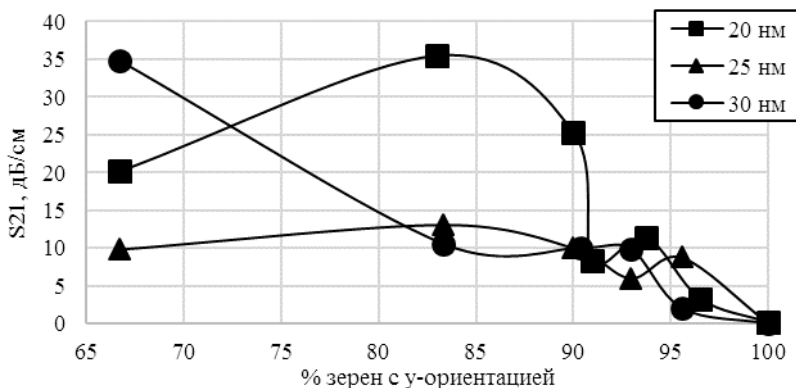


Рис. 1. Зависимость параметра S21 волноводной структуры от содержания у-ориентированных зерен

Анализируя итоговые результаты, можно заметить, что при увеличении количества у-ориентированных зерен до 83–90% наблюдается увеличение оптических потерь, что можно связать с увеличением количества взаимодействия света с границами зерен разных ориентаций. Помимо этого, в диапазоне 90–100% наблюдается резкое уменьшение оптических потерь, связанное с приближением состояния поликристаллической пленки с монокристаллической.

Поскольку полученные результаты могут быть обоснованными с точки зрения физических явлений, модель имеет право на использование для оценочных расчетов поликристаллических волноводов, но требует обязательной дальнейшей верификации на экспериментальных образцах.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2025-0002 «Исследование и разработка чувствительных элементов сенсорных систем на основе фотонных интегральных схем»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Sulser F. et al. Photonic crystal structures in ion-sliced lithium niobate thin films // Optics Express. – 2009. – Vol.17, No. 22. – P. 20291–20300.
2. Bornand V. LiNbO₃ thin films deposited on Si substrates: a morphological development study / V. Bornand I., Huet, P. Papet // Materials Chemistry and Physics. – 2002. – Vol. 77. – P. 571–577.
3. Рост и субструктура пленок ниобата лития / В.А. Дыбов, Д.В. Сериков, Г.С. Рыжкова, А.И. Донцов // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 51–59.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ОБЗОР О МЕТАЛИНЗАХ

*Д. Шарба, аспирант каф. СВЧиКР**Научный руководитель А.С. Перин, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.**г. Томск, ТУСУР, dsharba@hotmail.co.uk*

Рассматриваются основные принципы действия металинз, их принцип работы, моделирование, применение, использование их в волоконно-оптических системах, преимущества их использования в лазерной связи и разница между традиционными линзами и металинзами.

Ключевые слова: FSO, FDTD, FEM, RCWA.

Лазерные системы связи в свободном пространстве (FSO) либо через оптоволокно становятся все более важными для высокоскоростных телекоммуникаций как на Земле, так и в космосе. Традиционные оптические элементы, такие как линзы и зеркала, имеют ограничения в размерах, массе и производительности. Металинзы – инновационные плоские оптические устройства, которые позволяют преодолеть эти ограничения благодаря их компактности, легкости и способности эффективно управлять светом.

Цель работы – сравнительное исследование металинзы в области волоконно-оптической связи, подчеркивающее разницу между ними и обычными линзами.

Металинзы представляют собой плоские оптические устройства, состоящие из искусственных структур, называемых метаатомами. Эти структуры взаимодействуют с электромагнитным излучением на наноуровне, что позволяет контролировать фазу, амплитуду и поляризацию света. Также для достижения высокого качества изображения нам необходимо рассчитать локальную фазу на поверхности металинзы, используя следующее уравнение:

$$\varphi(r) = -\frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{r^2 + f^2} - f),$$

где $\varphi(r)$ – фазовый профиль, λ – длина волны, f – фокусное расстояние, а r – радиальная позиция.

Принцип действия металинз. Основной принцип работы металинз основан на концепции геометрической фазы. Каждый метаатом изменяет фазу световой волны в зависимости от своей ориентации.

Металинзы состоят из тщательно расположенных «мета-атомов» с подволновыми структурами. Регулируя геометрию этих ячеек, можно изменять фазовые сдвиги, которые испытывает распространяющееся электромагнитное поле. Зная зависимость фазы от геометрических

параметров, можно создать металинзу с произвольным фазовым профилем, размещая метаатомы в необходимых позициях.

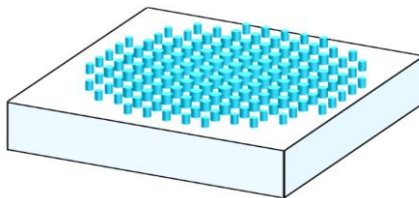


Рис. 1. Структура металинзы и метаатомы

Применение мета-линз. Металинзы находят применение в различных областях:

- оптические коммуникации – интеграция с волоконной оптикой;
- квантовые технологии – контроль фазового сдвига в фотонных схемах;
- биомедицинская оптика – миниатюрные объективы для микроскопии;
- дисплеи и дополненная реальность – компактные оптические системы.

Металинзы открывают новые возможности в оптике за счёт миниатюризации, высокой точности фазового управления и интеграции с фотонными технологиями. Их развитие способствует созданию более эффективных и компактных оптических устройств будущего.

Использование металинзы в волоконно-оптических системах. Металинзы обладают большим потенциалом в области волоконно-оптических систем благодаря своим компактным размерам и возможности точного управления фазой светового сигнала. Они могут использоваться для:

- коллимации и фокусировки света при соединении оптических волокон;
- компенсации аберраций в многомодовых волоконно-оптических системах;
- оптимизации связи между волокном и фотонными чипами, что снижает потери при вводе и выводе сигнала;
- формирования адаптивных оптических систем, обеспечивающих динамическое управление светом в оптических коммуникациях.

Использование металинз в лазерной связи дает следующие преимущества:

- увеличение пропускной способности: металинзы могут значительно увеличить пропускную способность систем лазерной связи за счет более эффективного управления светом;

- снижение потерь: использование металинз позволяет минимизировать потери сигнала, что особенно важно для длинных дистанций передачи.

- компактность и легкость: металинзы могут быть изготовлены в миниатюрных размерах, что упрощает интеграцию в существующие системы.

Разница между традиционными линзами и металинзами представлена в таблице.

Разница между традиционными линзами и металинзами	
Традиционные линзы	Металинзы
Основанные на принципах геометрической оптики, формируют изображения за счёт преломления света	Используют наноструктурированные поверхности для управления фазой, амплитудой и поляризацией света
Обычные линзы и металинзы дополняют друг друга в современных оптических технологиях. Обычные линзы продолжают использоваться в классических оптических системах, тогда как металинзы позволяют значительно уменьшить габариты и повысить функциональность оптических приборов. Их интеграция с волоконной оптикой открывает новые возможности в передаче данных, миниатюризации устройств и квантовых коммуникациях	

Методы моделирования металинзы:

- конечных разностей во временной области (FDTD) решает уравнения Максвелла для взаимодействия света с метаатомами;
- конечных элементов (FEM);
- строгого анализа связанных волн (RCWA).

Заключение. В данном исследовании теоретически рассмотрены металинзы, их важность и влияние на уменьшение размеров оптических устройств. Были изучены различные методы моделирования, что привело к реализации моделирования металинз с использованием метода FDTD в языке Python. Он был выбран за его высокую точность и удобство по сравнению с другими рассмотренными методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Khorasaninejad M. Metalenses: Versatile nanophotonic devices for imaging and beyond / M. Khorasaninejad, F. Capasso // Light: Science & Applications. – 2017.
2. Dielectric metasurfaces for complete phase modulation / A. Arbabi, Y. Horie, M. Bagheri, A. Faraon // Nature Nanotechnology. – 2015.
3. Achromatic metalens array for full-colour light-field imaging / Ren Jie Lin, Vin-Cent Su, Shuming Wang, Mu Ku Chen, Tsung Lin Chung, Yu Han Chen, Hsin Yu Kuo, Jia-Wern Chen, Ji Chen, Yi-Teng Huang, Jung-Hsi Wang, Cheng Hung Chu, Pin Chieh Wu, Tao Li, Zhenlin Wang, Shining Zhu and Din Ping Tsai // Nature Nanotechnology. – 2019.

**ОБЗОР СПОСОБОВ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ
В ТОНКОПЛЁНОЧНОМ НИОБАТЕ ЛИТИЯ НА ИЗОЛЯТОРЕ***Д.В. Емельянов, И.А. Гуляев, магистранты ПИИШ**Научный руководитель А. Мырзахметов, инж. ЛФИС**г. Томск, ТУСУР, yemelyanov_dima02@mail.ru*

Сравнены различные способы эффективной генерации второй гармоники (ГВГ) в тонкопленочном ниобате лития (ТНЛ) на изоляторе, включая квазифазовый синхронизм с использованием периодической поляризации и моды с высокой нелинейностью. Для максимальной эффективности ГВГ с целью создания более компактных и производительных устройств рекомендовано использование кольцевых структур.

Ключевые слова: генерация второй гармоники, волновод, тонкопленочный ниобат лития, фазовое согласование, нелинейность второго порядка.

ТНЛ применяется в изделиях оптоэлектроники и интегральной фотоники благодаря высокой эффективности в широком оптическом спектре и своим нелинейным свойствам, что определяет эффективность такого процесса, как ГВГ [1]. В последние десятилетия общая тенденция исследований и разработок в области интегральной фотоники и оптоэлектроники обусловлена необходимостью создания компактных и высокоэффективных электрооптических устройств. Сегодня для подобных устройств представлено множество способов реализации эффективности ГВГ, но не все способы в действительности приносят ожидаемый результат [2]. В частности, нет исследований по выбору оптимального способа ГВГ.

Цель данной работы – найти оптимальный способ ГВГ на основе ТНЛ на изоляторе. Для её достижения целесообразно выполнить обзор доступных способов реализации высокоэффективной ГВГ в ТНЛ на изоляторе.

ГВГ может реализовываться в гребенчатых волноводах с использованием фазовой модуляции. Так, в работе [3] сам волновод представляет собой структуру с двойным гребнем. Пластина состоит из слоя ниобата лития (LiNbO_3) на слое диоксида кремния (SiO_2), который, в свою очередь, находится на кремниевой подложке. Разница в показателях преломления LiNbO_3 и SiO_2 обеспечивает удержание световых мод в слое ниобата лития. Геометрия гребней определяется углами наклона 75° , глубинами травления (H_{gr} и H_{lr}) и ширинами (W_1 и W_2). Основные потери в волноводе связаны с рассеянием света на ше-

роховатости боковых стенок. Потери авторы моделировали с помощью САПР, учитывая параметры шероховатости. Полученные коэффициенты затухания для накачки ($\lambda = 1550$ нм, $\alpha = 4,9$ дБ/м) и сигнала ($\lambda = 775$ нм, $\alpha = 7,3$ дБ/м) указывают на возможность создания эффективных фотонных интегральных схем на основе данной технологии при эффективности преобразования 3,92%. Однако необходимо учитывать влияние качества изготовления на реальные потери в волноводе.

Помимо гребенчатых волноводов, ГВГ может также реализоваться в канальных волноводах из ниобата лития с помощью решеток. Так, в работе [4] представлен теоретический принцип предлагаемой ГВГ в канальном волноводе LiNbO_3 . Данная платформа состоит из ниобата лития Z-среза толщиной 300 нм на подложке SiO_2 толщиной 1,8 мкм. Высокий контраст показателей преломления и малая толщина пленки обеспечивают хорошее ограничение световых мод. Вместо использования сложных методов поляризации или проектирования дисперсионных свойств авторы напрямую выполняют условие фазового согласования с помощью простой решетки, которая преобразует основную волну свободного пространства в направленную вторую гармонику. Это упрощает процесс и делает его более технологичным. Моделирование методом конечных разностей во временной области показывает, что при угле 58° сигнал второй гармоники генерируется и накапливается в волноводе с эффективностью преобразования 15,6 %. При отклонении от оптимального угла падения эффективность ГВГ резко падает из-за фазового рассогласования.

Еще один метод преобразования частоты ГВГ воплощается в работе [5] на основе периодических поляризованных волноводов ниобата лития. Этот волновод длиной 4 мм продемонстрировал эффективность нелинейного преобразования 8% с импульсной лазерной накачкой с длиной волны около 1550 нм. Тонкопленочный периодически поляризованный волновод на подложке ниобата лития длиной 4,8 мм с использованием непрерывной накачки с длиной волны около 1530 нм продемонстрировал нормализованную эффективность нелинейного преобразования $160\%/\text{Вт}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Использование резонаторов позволяет значительно усилить эффективность ГВГ за счет многократного прохождения волн накачки через нелинейный кристалл, что приводит к накоплению генерируемой второй гармоники. Так, авторы [6] обнаружили широкополосную ГВГ в резонаторе типа «гоночная дорожка» или изогнутом волноводе с определенной геометрической структурой, в которой создается спонтанное квазифазовое согласование. Схема структуры в микро-рейс-трековом резонаторе на X-срезе ТНЛ имеет длину прямой сек-

ции L_0 и радиус полуокружности R . Прямой волновод выровнен по оси Y .

Кольцевой резонатор из ТНЛ с периодически поляризованным волноводом, но с интерферометром Маха–Цендера (ИМЦ) используется для генерации одномодового сжатого света и одиночных фотонов в работе [7]. Эффективность преобразования достигает 27,2% благодаря температурной настройке ИМЦ и резонатора для двойного резонанса. Термооптическая настройка предпочтительнее электрооптической из-за компактности и стабильности. Устройство состоит из ИМЦ, соединенного с кольцевым резонатором, и тепловых нагревателей. Прямая часть волновода включает секцию с периодической поляризацией для квазифазового согласования мод основной и второй гармоник. Настройка температур позволяет активно регулировать спектр пропускания и резонансные длины волн. Это устройство подходит для генерации сжатого света и одиночных фотонов в телекоммуникационном диапазоне с накачкой в ближнем ИК-диапазоне, обеспечивая высокую пропускную способность при низкой мощности накачки и высокую эффективность.

Еще одним из используемых способов преобразования частоты с относительно высоким коэффициентом преобразования является ГВГ в ТНЛ с помощью наноструктур. В работе [8] авторы предлагают использовать плазмонные наноантенны на поверхности ТНЛ. Эти антенны создают плазмонные горячие точки, которые усиливают локальное электромагнитное поле, что, в свою очередь, усиливает ГВГ в ТНЛ. Схема плазмонной структуры наноантенны имеет форму бабочки поверх ТНЛ, которая преобразует Z-поляризованное фундаментальное гармоническое излучение во вторую гармонику в конфигурации обратного отражения.

Другой структурой преобразования частоты является двумерный нелинейный фотонный кристалл на подложке из LiNbO_3 с тетрагональной решеточной структурой. Так, в [9] на подложке LiNbO_3 толщиной 500 нм зарегистрировано двумерное распределение χ_z , показывающее орторомбическую решетчатую структуру. Процессы ГВГ иллюстрируют одновременное согласование фаз и пространственное разделение основных и гармонических волн в структуре двумерного фотонного кристалла. Измерения ГВГ проводились с помощью импульсного параметрического генератора LiNbO_3 с периодической настройкой решетки, работающего в диапазоне 1,55 мкм. Выходная пиковая мощность составляла 2 кВт, а частота следования импульсов – 4 кГц, при этом эффективность преобразования составила 7%.

Таким образом, для максимальной эффективности ГВГ с целью создания более компактных и производительных устройств рекомендуется метод кольцевых структур. Он является одним из наиболее используемых способов ГВГ с относительно высоким коэффициентом преобразования и, помимо этого, менее требовательным к технологии изготовления. За счет циркуляции света в резонаторе можно получить значительное усиление нелинейного процесса.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2025-0002 «Исследование и разработка чувствительных элементов сенсорных систем на основе фотонных интегральных схем»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Honardoost A. Rejuvenating a versatile photonic material: thin-film lithium niobate / A. Honardoost, K. Abdelsalam, S. Fathpour // *Laser & Photonics Reviews*. – 2020. – Vol. 14, No. 9. – P. 2000088.
2. Zhu D. et al. Integrated photonics on thin-film lithium niobate // *Advances in Optics and Photonics*. – 2021. – Vol. 13, No. 2. – P. 242–352.
3. Hansen M.T. et al. Efficient and robust second-harmonic generation in thin-film lithium niobate using modal phase matching // *Frontiers in Photonics*. – 2023. – Vol. 4. – P. 1324648.
4. Fang B. et al. Second-harmonic generation and manipulation in lithium niobate slab waveguides by grating metasurfaces // *Photonics Research*. – 2020. – Vol. 8, No. 8. – P. 1296–1300.
5. Vazimali M.G. Applications of thin-film lithium niobate in nonlinear integrated photonics / M.G. Vazimali, S. Fathpour // *Advanced Photonics*. – 2022. – Vol. 4, No. 3. – P. 034001–034001.
6. Yuan T. et al. Enhanced Nonlinear Frequency Conversion Bandwidth through Birefringence induced Mode Hybridization // *arXiv*. – 2024. – Vol. 6, No. 4. – P. 154–183.
7. McKenna T.P. et al. Ultra-low-power second-order nonlinear optics on a chip // *Nature Communications*. – 2022. – Vol. 13, No. 1. – P. 4532.
8. Li Z. et al. Plasmonic hotspot arrays boost second harmonic generation in thin-film lithium niobate // *Optics Express*. – 2024. – Vol. 32, No. 8. – P. 13140–13155.
9. Peng L.H. et al. Wavelength tunability of second-harmonic generation from two-dimensional $\chi(2)$ nonlinear photonic crystals with a tetragonal lattice structure // *Applied physics letters*. – 2004. – Vol. 84, No. 17. – P. 3250–3252.

ПОДСЕКЦИЯ 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Председатель – Суровцев Р.С., доцент каф. ТУ, к.т.н.;
зам. председателя – Белоусов А.О., доцент каф. ТУ, к.т.н.

УДК 004.514

МОДЕРНИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ И ИНТЕРФЕЙСА ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ КОРПУСОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

М.Е. Дорогов, В.А. Фецуков, студенты каф. ТУ
Научный руководитель А.А. Квасников, м.н.с. НИЛ ФИЭМС, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, m.dorogof@gmail.com

Приведены результаты модернизации программного модуля для оценки эффективности экранирования корпусов радиоэлектронных средств. Обновлено архитектура модуля, усовершенствован его графический интерфейс и улучшена визуализация трёхмерной модели корпуса.

Ключевые слова: программный модуль, эффективность экранирования, Qt, QML, C++, VTK.

Одним из средств обеспечения электромагнитной совместимости является экранирование. Для оценки эффективности экранирования (ЭЭ) корпусов радиоэлектронных средств (РЭС) используются разные численные и аналитические методы. На первом этапе проектирования РЭС применимы аналитические методы для быстрой предварительной оценки ЭЭ.

Известно множество различных методов для оценки ЭЭ корпуса с апертурами, которые были ранее реализованы в программном модуле «3D SEBOX» [1]. Модуль может быть улучшен как с точки зрения его функциональных возможностей, так и его интерфейса. Сбор обратной связи пользователей позволил выявить следующие недостатки модуля: неинтуитивный интерфейс пользователя, некорректное отображение модели корпуса и устаревший стек используемых технологий.

Цель данной работы – представить результаты совершенствования модуля оценки ЭЭ корпусов РЭС. Для её достижения в работе решены следующие задачи: усовершенствован метод отображения трёхмерной модели, переработан графический интерфейс пользователя и модернизирована архитектура программного модуля.

Совершенствование программного модуля. В существующем программном модуле оценки ЭЭ присутствует ряд недостатков. Одним из них является некорректное отображение трёхмерной модели корпуса при изменении масштаба. При отдалении до определенного масштаба отображение модели переворачивается и она начинает приближаться. Кроме того, при вводе чрезмерно больших значений в поля настройки геометрии корпуса визуализация модели не помещается полностью в поле для отображения? и её невозможно рассмотреть. Для решения этой проблемы принято решение обновить стек технологий. Для визуализации трёхмерной модели использована библиотека VTK [2] вместо компонентов фреймворка Qt/QML. Эта библиотека выбрана благодаря совместимости с Qt и возможности быстрого рендера трёхмерных моделей [3]. Кроме того, выполнен переход на более современные версии фреймворка (с Qt5 на Qt6) и стандарта языка (с C++11 на C++17).

Из-за смены стека технологий и перехода на более современные версии библиотек принято решение модернизировать архитектуру программного модуля. Обновленная диаграмма классов программного модуля представлена на рис. 1.

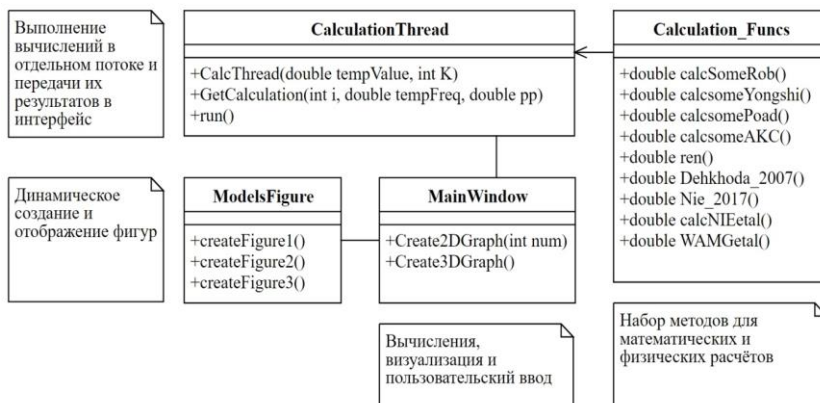


Рис. 1. Диаграмма классов программного модуля

Так, функционал большей части программы теперь находится в одном главном классе – MainWindow. Это сделано для упрощения

структуры, облегчения поддержки кода, удаления лишних или устаревших функций и из-за особенностей нового интерфейса. Также старые классы, отвечавшие за отображения трёхмерной модели, в новой архитектуре заменены новым классом – ModelsFigure.

Пользовательский интерфейс программного модуля доработан так, что он стал интуитивен: взаимодействие пользователя с программой происходит сверху вниз, что соответствует привычной логике. Все параметры структурированы, а визуальные изменения отображаются сразу, без необходимости переключаться между вкладками (рис. 2), как это было реализовано в предыдущей версии модуля.

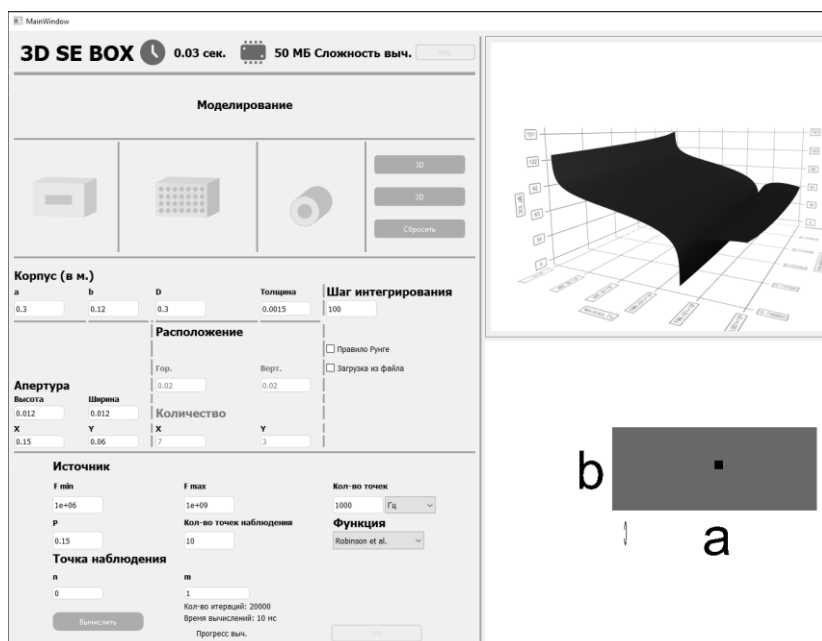


Рис. 2. Обновленный графический интерфейс пользователя программного модуля

Заключение. Представлены результаты модернизации программного модуля вычисления ЭЭ корпусов РЭС. Изменением подверглись: архитектура программы, интерфейс пользователя, стек технологий и визуализация отображения модели корпуса.

Следующим этапом является совершенствование функциональных возможностей модуля: добавление новых математических моделей и алгоритмов расчета ЭЭ, новых видов корпусов, а также встраивание обновленной версии модуля в систему TUSUR.EMC.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прототип программного модуля для оценки эффективности корпусов радиоэлектронных средств / А.А. Иванов, А.А. Квасников, С.П. Куксенко, М.Е. Комнатнов // Технологии ЭМС. – 2019. – № 4 (71). – С. 5–15.
2. VTK – the Visualization Toolkit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vtk.org>, свободный (дата обращения: 15.01.2025).
3. Qt Framework [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.qt.io>, свободный (дата обращения: 25.12.2024).

УДК 004.056

ПРОТОТИП МОДУЛЯ ЛИЦЕНЗИРОВАНИЯ И АВТОРИЗАЦИИ СИСТЕМЫ TUSUR.EMC

М.Е. Дорогов, В.А. Фецуков, студенты каф. ТУ

*Научный руководитель А.А. Квасников, м.н.с. НИЛ ФИЭМС, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, m.dorogof@gmail.com*

Приведены результаты разработки модуля лицензирования и авторизации системы TUSUR.EMC. Создана онлайн-база данных для хранения информации о пользователях.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, моделирование, система TUSUR.EMC, C++, Qt, SQL.

Современные системы автоматического проектирования (САПР) играют ключевую роль при разработке устройств и их моделировании. Их применение позволяет значительно сократить вероятность ошибок и оптимизировать процесс проектирования. Совершенствование САПР становится особенно актуальным, поскольку растущая сложность электронных устройств требует точных, быстрых и эффективных инструментов проектирования.

Одной из систем для моделирования задач электромагнитной совместимости является TUSUR.EMC [1]. Она на протяжении многих лет разрабатывается на кафедре телевидения и управления в ТУСУРе. К настоящему времени возникла потребность в разработке модуля лицензирования и авторизации системы TUSUR.EMC. Его внедрение необходимо для удобства коммерческого распространения системы, улучшения контроля доступа, сбора статистической информации и автоматизации выдачи лицензий. Это позволит значительно упростить отслеживание возникающих ошибок, вести учёт пользователей, а также модернизацию функциональных возможностей системы.

Таким образом, цель работы – представить результаты разработки прототипа модуля лицензирования и авторизации для распространения программного обеспечения TUSUR.EMC. Для достижения цели нужно решить следующие задачи: разработать ранний прототип мо-

дуля регистрации пользователей; создать онлайн-базу данных для хранения информации о пользователях; внедрить систему шифрования и безопасного хранения ключей системы.

Создание системы регистрации пользователей. Система TUSUR.EMC разработана с использованием языка программирования C++ и фреймворка Qt [2], которые выбраны для облегчения интеграции в имеющуюся кодовую базу системы. Для хранения данных выбрана база данных SQL [3] благодаря её высокой совместимости с фреймворком Qt, что обеспечило удобство интеграции и эффективное управление информацией.

Для пояснения процесса входа в учётную запись системы создана блок-схема, которая представлена на рис. 1.

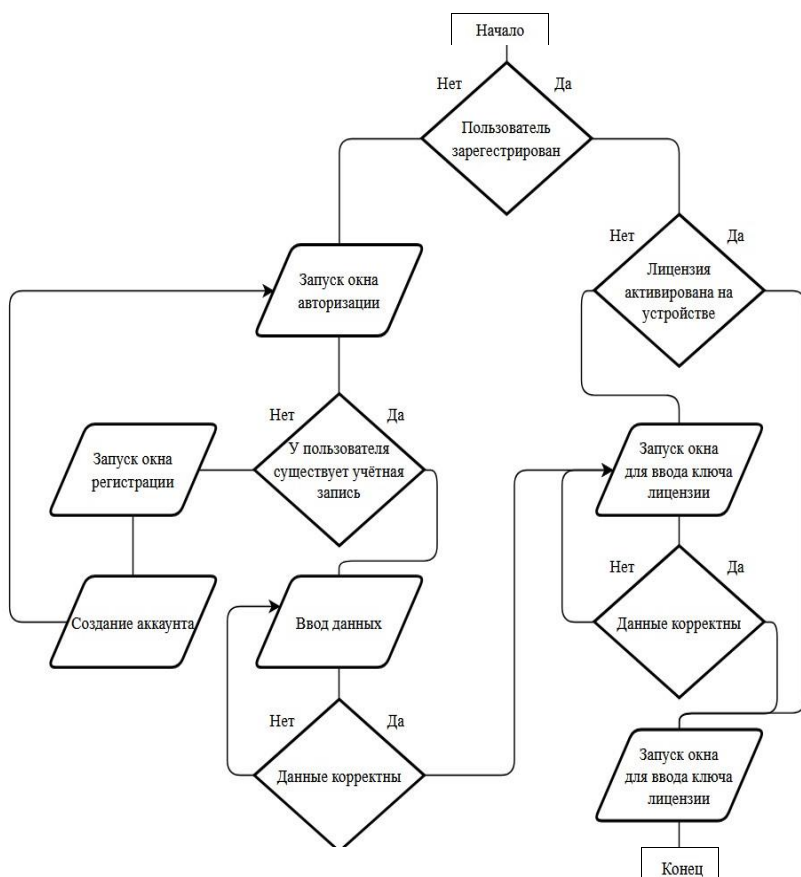


Рис. 1. Блок-схема алгоритма лицензирования и авторизации системы

Для активации ключа программы пользователю необходимо войти в свой аккаунт или создать новый. Регистрация осуществляется с использованием логина и пароля. После успешного входа и ввода действительного лицензионного ключа программа активируется и становится доступной для использования. Интерфейс модуля показан на рис. 2.

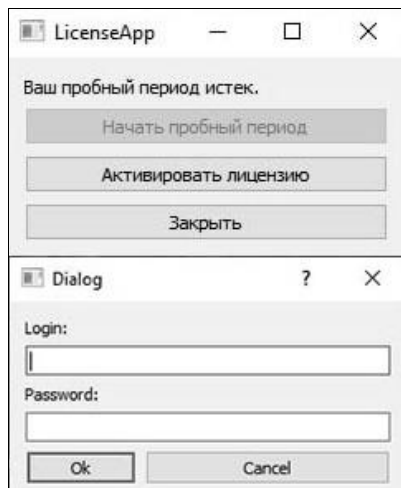


Рис. 2. Интерфейс прототипа модуля лицензирования и авторизации системы TUSUR.EMC

Использование базы данных. Для хранения и управления данными пользователей в системе TUSUR.EMC принято решение использовать базу данных SQL. Этот выбор обусловлен наличием в фреймворке Qt готовых классов и решений для работы с SQL, а также надежностью и эффективностью обработки данных.

При входе в систему пользователь вводит свои учетные данные, которые проверяются на соответствие данным, хранящимся в базе. Аналогично, при активации продукта система сверяет введенный ключ с зарегистрированными данными. Если у пользователя отсутствует действующий ключ, ему предоставляется возможность ввести лицензионный код для активации.

Заключение. Разработан прототип модуля лицензирования и авторизации системы TUSUR.EMC и создана онлайн-база данных для хранения учетной информации о пользователях.

В дальнейшем планируется добавить веб интерфейс для модуля с возможностью онлайн-входа в личный кабинет, просмотра и покупки ключей продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Система TUSUR.EMC – программный комплекс для моделирования задач электромагнитной совместимости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://emc.tusur.ru/talgat-software/>, свободный (дата обращения: 08.02.2025).
2. Qt Framework [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.qt.io/>, свободный (дата обращения: 14.02.2025).
3. International Organization for Standardization. ISO/IEC 9075:2023 Information technology. – Database languages – SQL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/76583.html>, свободный (дата обращения: 21.02.2025).

УДК 621.396

СРАВНЕНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗРЕЖЕННЫХ АНТЕНН, РАССЕИВАТЕЛЕЙ И ЭКРАНОВ ИЗ ПРОВОДНЫХ СЕТОК

К.С. Лукас, Т.Ф. Данг, аспиранты каф. ТУ

*Научный руководитель Т.Р. Газизов, зав. каф. ТУ, д.т.н., проф.
г. Томск, TUSUR, cangasamuel01@yandex.ru*

Известно, что обеспечение электромагнитной совместимости часто приводит к необходимости экранирования для уменьшения излучаемых эмиссий от изделия либо его восприимчивости к излучаемым эмиссиям от внешнего источника. Однако экраны увеличивают массу и размеры изделия, что часто нежелательно. Недавно предложен и уже детально исследован способ создания разреженных антенн из проводной сетки, позволяющий контролировать уменьшение массы при сохранении радиотехнических характеристик антенны. Эта идея применена и к электромагнитным рассеивателям, для которых получены первые результаты. Между тем она применима и к экранам, но ранее не рассматривалась. Здесь впервые в единой работе рассмотрены все три объекта (разреженные антенны, рассеиватели и экраны) в части их реализации с акцентом на её специфику.

Ключевые слова: проводная сетка, разреженные антенны, разреженные рассеиватели, разреженные экраны.

Электромагнитные экраны нашли широкое применение в разных областях науки и техники (электроника, энергетика, строительство, медицина и др.) и являются неотъемлемой частью средств защиты от нежелательных электромагнитных полей (ЭМП) [1]. Воздействие ЭМП на радиоэлектронное средство затрудняет его функционирование. Поэтому часто применяют экранирование отдельных элементов, узлов, устройств и др. Однако электромагнитные экраны увеличивают

массу и размеры изделий, что часто нежелательно. Для многих областей экраны выполняют в виде сеток для снижения массы, но этого может быть недостаточно. Недавно предложен и уже детально исследован способ создания разреженных антенн и рассеивателей из проводной сетки (ПС), позволяющий контролировать уменьшение их массы при сохранении характеристик. Между тем можно предположить, что он применим и к экранированию, но ранее это не рассматривалось. Цель работы – провести анализ и систематизацию особенностей получения разреженных антенн, рассеивателей и экранов.

В работах [2, 3] применены компьютерное моделирование на основе метода моментов (для определения значения токов в каждом сегменте проводной сетки с помощью решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)) и алгоритм аппроксимации оптимальной токовой сеткой (АОТС). Суть последнего заключается в исключении проводов с малым током, модуль которого меньше заданного допуска удаления элемента сетки (ДУЭС). Рассмотрим алгоритмы получения разреженных структур отдельно для антенн, рассеивателей и экранов.

Алгоритм получения разреженной антенны:

1. Построить геометрическую модель антенны.
2. Если нужно, рассчитать радиотехнические характеристики антенны для ближней или дальней зоны.
3. Если антенна не из ПС, то выполнить аппроксимацию проводящей поверхности антенны посредством ПС.
4. Рассчитать радиотехнические характеристики антенны из ПС.
5. Сохранить параметры n -го провода (радиус, координаты начала и конца) ПС, где $n = 1, 2, \dots, N$.
6. Согласно методу моментов [4], вычислить элементы матрицы $\mathbf{Z}$ порядка N .
7. Задать вектор воздействий $\mathbf{v}$ (1 В в элементах с индексом, соответствующим проводу, к которому подключен источник, и 0 В – в остальных).
8. Решить СЛАУ $\mathbf{Z}\mathbf{i} = \mathbf{v}$ и получить модуль тока в каждом проводе из вектора $\mathbf{i}$.
9. Определить максимальный и средний модули тока в ПС.
10. Нормировать модуль тока каждого провода относительно максимального или среднего значения тока.
11. Задать уровень ДУЭС.
12. Исключить все провода с нормированным модулем тока, меньшим, чем ДУЭС.

13. Построить (создать) разреженную структуру из оставшихся проводов посредством одной из АОТС.

14. Рассчитать радиотехнические характеристики разреженной антенны.

15. Сравнить характеристики разреженной и исходной антенн.

Алгоритм получения разреженного рассеивателя:

1. Построить геометрическую модель рассеивателя.

2. Если нужно, рассчитать характеристики рассеивателя в дальней зоне.

3. Если рассеиватель не из ПС, то выполнить аппроксимацию проводящей поверхности рассеивателя посредством ПС.

4. Рассчитать характеристики рассеивателя из ПС.

5. Сохранить параметры n -го провода (радиус, координаты начала и конца) ПС, где $n = 1, 2, \dots, N$.

6. Согласно методу моментов, вычислить элементы матрицы $\mathbf{Z}$ порядка N .

7. Задать вектор воздействия в виде плоской волны и, если нужно, изменения её параметров.

8. Решить СЛАУ $\mathbf{Z}\mathbf{i} = \mathbf{v}$ и получить модуль тока в каждом проводе из вектора $\mathbf{i}$.

9. Определить максимальный и средний модули тока в ПС.

10. Нормировать модуль тока каждого провода относительно максимального или среднего значения тока.

11. Задать уровень ДУЭС.

12. Исключить все провода с нормированным модулем тока, меньшим, чем ДУЭС

13. Построить (создать) разреженную структуру из оставшихся проводов посредством одной из АОТС.

14. Рассчитать характеристики разреженного рассеивателя.

15. Сравнить характеристики разреженного и исходного рассеивателей.

Алгоритм получения разреженного экрана:

1. Построить геометрическую модель экрана.

2. Если нужно, рассчитать характеристики экрана [5] (в ближней зоне).

3. Если экран не из ПС, то выполнить аппроксимацию проводящей поверхности экрана посредством ПС.

4. Рассчитать характеристики экрана из ПС.

5. Сохранить параметры n -го провода (радиус, координаты начала и конца) ПС, где $n = 1, 2, \dots, N$.

6. Согласно методу моментов, вычислить элементы матрицы $\mathbf{Z}$ порядка N .

7. Задать вектор воздействия в виде плоской волны и, если нужно, изменения её параметров.

8. Решить СЛАУ $\mathbf{Z}\mathbf{i} = \mathbf{v}$ и получить модуль тока в каждом проводе из вектора $\mathbf{i}$.

9. Определить максимальный и средний модули тока в ПС.

10. Нормировать модуль тока каждого провода относительно максимального или среднего модуля тока.

11. Задать уровень ДУЭС.

12. Исключить все провода с нормированным модулем тока, меньшим, чем ДУЭС

13. Построить (создать) разреженную структуру из оставшихся проводов посредством одной из АОТС.

14. Рассчитать эффективность экранирования разреженного экрана.

15. Сравнить характеристики разреженного и исходного экранов.

Краткое сравнение антенны, рассеивателя и экрана:

1. Воздействием для антенны является 1 В в зазоре, а для рассеивателя и экрана – плоская волна.

2. Для экрана и антенны вычисляется поле в ближней или дальней зоне, а для рассеивателя – только в дальней.

3. Рабочая частота или диапазон частот для антенн, рассеивателей и экранов имеют свою специфику.

Таким образом, рассмотрены алгоритмы получения разреженных структур отдельно для антенн, рассеивателей и экранов. Выявлено, что они имеют много схожих шагов, но имеют и различия, которые надо учесть при реализации разреженных экранов.

Работа выполнена по проекту FEWM-2023-0014.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электромагнитные экраны на основе алюминия, его оксидов и углеродных волокон. Технологии, конструкции и свойства / Х.Д.А. Абдулхади, В.А. Богуш, О.В. Бойправ, Л.М. Лыньков, Н.И. Мухуров, А.М. Прудник; под ред. Л.М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2021. – 120 с.

2. Нгуен М.Т. Инновационные подходы к проектированию разреженных проводно-сеточных антенн: разработка алгоритмов и оценка их эффективности // Системы управления, связи и безопасности. – 2024. – № 4. – С. 1–47.

3. Generation of sparse antennas and scatterers based on optimal current grid approximation / T.P. Dang, M.T. Nguyen, A.F. Alhaj Hasan, T.R. Gazizov // Preprints.org (not peer-reviewed). – 2024. – P. 1–28.

4. Harrington R.F. Matrix methods for field problems // Proceedings of the IEEE. – 1967. – Vol. 55, No. 2. – P. 136–149.

5. Аполлонский С.М. Справочник по расчету электромагнитных экранов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНДУКТИВНОСТИ ОДИНОЧНОГО ПЕРЕХОДНОГО ОТВЕРСТИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Р.Б. Михо, аспирант каф. ТУ

*Научный руководитель Р.С. Суровцев, доцент каф. ТУ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, roman.b.mikho@tusur.ru*

Выполнено сравнение аналитических и численных методов для вычисления индуктивности одиночного переходного отверстия многослойной печатной платы. Результаты сравнения показали, что аналитический расчёт индуктивности может быть довольно близок к численному, что говорит о применимости аналитических выражений для первичной грубой оценки.

Ключевые слова: переходное отверстие, индуктивность, моделирование.

Современные тенденции построения технических средств (ТС) направлены на миниатюризацию. Уменьшение габаритов электронных компонентов позволило увеличить количество функциональных узлов, размещаемых на печатной плате. Поскольку основным требованием к разрабатываемым ТС является рост функциональности и сохранение размеров, то в их конструкциях широко применяют многослойные печатные платы (МПП). Одними из основных элементов МПП являются переходные отверстия (ПО), которые соединяют проводящий рисунок на разных слоях платы. Применение ПО имеет ограничения. Основное из них заключается в том, что ПО формирует неоднородность на пути распространения сигнала из-за влияния паразитной индуктивности и ёмкости. Использование ПО при трассировке низкочастотных цепей не вносит искажения в передаваемый сигнал, поскольку его длина волны лежит далеко за пределами резонансных длин волн ПО. В то же время с ростом частоты игнорирование паразитных свойств ПО приводит к ухудшению целостности сигнала и нарушению работоспособности ТС.

При определении геометрических параметров ПО в конструкции МПП основной задачей является учёт паразитной индуктивности ПО. Это связано с тем, что во всех проектируемых МПП индуктивно-ёмкостный баланс ПО смещён в сторону индуктивности [1], что негативно сказывается на волновом сопротивлении ПО. При увеличении толщины МПП индуктивность возрастает линейно и это нужно учитывать для предотвращения неконтролируемого роста волнового сопротивления ПО и ухудшения целостности сигналов.

Существует несколько методов вычисления индуктивности ПО. Первый и самый простой – аналитический. Он основан на выражениях, полученных в результате аппроксимации структуры ПО какой-либо конструкцией с помощью физико-математического аппарата. Второй – численный. Он предполагает применение систем для моделирования. Совместное применение двух методов повышает точность результата.я индуктивности ПО на печатной плате разными методами.

Известны разные аналитические выражения для определения индуктивности ПО. Каждое выражение предлагает разный подход к аппроксимации структуры, что и определяет их точность. Рассмотрим наиболее простые выражения (не учитывают параметры стека МПП). Выражение (1) предлагает расчёт индуктивности, лишь на основе толщины МПП и диаметра ПО [2]:

$$L = 20h \left[\ln(4h/d) + 1 \right], \quad (1)$$

где h – толщина МПП, d – диаметр ПО.

Выражение (2) описывает ПО как отрезок коаксиального кабеля, окружённого экраном, который по существу является контактной площадкой [3].

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln(D/d) \cdot h, \quad (2)$$

где D – диаметр контактной площадки.

Наиболее распространённым численным методом, применяемым в системах моделирования, является метод конечных элементов (МКЭ). Данный метод основан на разбиении сложного участка на несколько простых, для которых впоследствии и выполняется расчёт. Другой метод, позволяющий численно вычислить индуктивность ПО в МПП, основан на стандарте IPC-2152, в котором описано, как изменяются основные электрические параметры ПО в зависимости от геометрии.

Для расчёта ёмкости ПО приняты следующие параметры:

- толщина МПП $h = 1,6$ мм;
- диаметр отверстия $d = 0,4$ мм;
- диаметр контактной площадки $D = 0,8$ мм;
- диаметр антипада на внутренних слоях МПП 1,2 мм.

В таблице сведены результаты вычислений ёмкости одиночного ПО разными методами для заданной конфигурации.

Результаты вычислений индуктивности одиночного ПО

Метод	(1)	(2)	IPC-2152	МКЭ
L , нГн	1,21	0,22	1,207	1,08

Из таблицы видно, что индуктивность одиночного ПО варьирует в диапазоне от 1 до 1,21 нГн. Выражение (2) даёт заниженное значение индуктивности, чем сильно отличается от результатов, полученных в системах моделирования и с помощью выражения (1). Отличие может заключаться в подходе, используемом для аппроксимации структуры ПО. Отметим, что результаты вычисления индуктивности в системах моделирования также отличаются, что может быть связано с различием методов для расчёта индуктивности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nieh C-M. Far-end Crosstalk Cancellation using Via Stub for DDR4 Memory Channel / C-M. Nieh, J. Park // IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference. Nevada, 2013. – P. 2035–2040.
2. Ardizzoni J. A Practical Guide to High Speed Printed-Circuit-Board Layout // Analog Dialogue – 2005. – Vol. 39, № 9. – P. 1–6.
3. Simonovich L. Method of Modeling Differential Vias / L. Simonovich, E. Bogatin, Y. Cao // White Paper, Lamsim Enterprises inc, 2011. – 42 p.

УДК 621.391.825

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ В ВИДЕ СПИРАЛИ

М.С. Мурманский, аспирант каф. СВЧиКР

*Научный руководитель Е.С. Жечев, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, mihailmurmanskii@gmail.com*

Представлены результаты анализа характеристик связанной микрополосковой линии передачи в виде спирали, реализованной в интегральном виде. Исследуемая линия обеспечивает уменьшение амплитуды сверхширокополосной электромагнитной помехи в 1,66 раза. Уровень дальней перекрестной помехи в линии не превышает 70 мВ.

Ключевые слова: микрополосковые линии передачи, трассировка в виде спирали, временной отклик, электромагнитные помехи, интегральная схема.

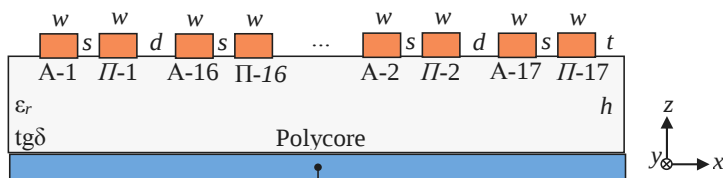
Интегральные схемы (ИС) являются неотъемлемым компонентом современных радиотехнических систем [1]. Они обладают малыми размерами, которые варьируют от единиц микронов до нанометров и работают в широком диапазоне частот [2]. Однако ИС подвержены влиянию кондуктивных электромагнитных помех, которые могут вызвать различные повреждения: от пробоя диэлектрика до выгорания компонента [3].

Особое влияние оказывают сверхширокополосные помехи (СШП), которые за счет своего малого времени нарастания и высокой амплитуды могут выводить из строя как элементы ИС, так и ИС целиком. Поэтому ИС нуждаются в защите от такого рода помех. Целью данной работы является анализ характеристик связанных МПЛ в виде спирали, реализованных в интегральном виде, при воздействии СШП помехи.

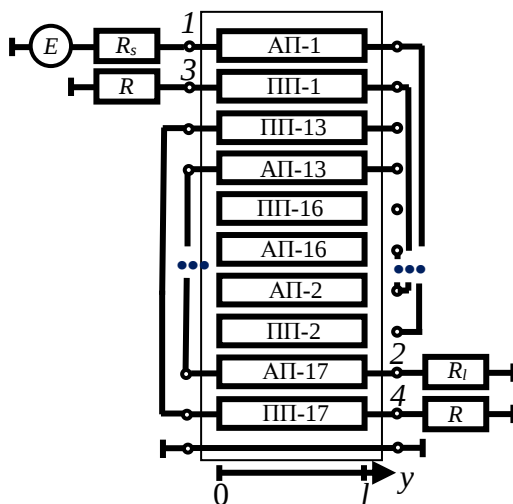
На рис. 1, а, представлено поперечное сечение интегральной линии передачи в виде спирали.

На рис. 1, б показана эквивалентная схема включения линии.

На рис. 1 в показан двумерный вид на интегральную линию передачи сверху. Помеховое воздействие подается с генератора E на порт 1 схемы, а выходной сигнал снимается с порта 2. Сопротивление резисторов принято по 50 Ом.



а



б

Рис. 1 (начало)



6

Рис. 1 (окончание). Поперечное сечение (а), эквивалентная схема включения (б) и двумерный вид интегральной линии передачи в виде спирал (в)

Геометрические параметры структуры: ширина и толщина проводников $w = 10$ мкм и $t = 5,1$ мкм соответственно, расстояние между проводниками $s = 10$ мкм, расстояние между парами линий $d = 20$ мкм, толщина подложки $h = 100$ мкм. Общая длина линии принята $l = 33$ мм. В качестве диэлектрика использован материал марки Polyscog с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 9,7$ и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = 0,003$.

Для оценки помехоподавления интегральной линии передачи во временной области использовано СШП-воздействие: Гауссов импульс с шириной частотного спектра 0–6 ГГц и амплитудой 1 В [4].

На рис. 2 показаны временные отклики, полученные в портах 1 и 2. Видно, что амплитуда сигнала на выходе линии составляет 300 мВ, что соответствует ослаблению в 1,66 раза.

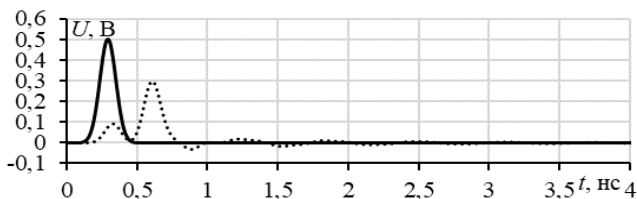


Рис. 2. Вычисленные формы напряжения в портах 1 (—) и 2 (---)

На рис. 3 показана форма дальней перекрестной помехи. Видно, что амплитуда дальней перекрестной помехи не превышает 70 мВ. Малое значение дальней перекрестной помехи обусловлено наличием отводов для соединения с измерительными GSG площадки.

Таким образом, выявлено, что использование интегральной МПЛ в виде спирали позволяет уменьшить амплитуду СШП ЭМП в

1,66 раза и обеспечивает уровень дальней перекрестной помехи, который не превышает 70 мВ.

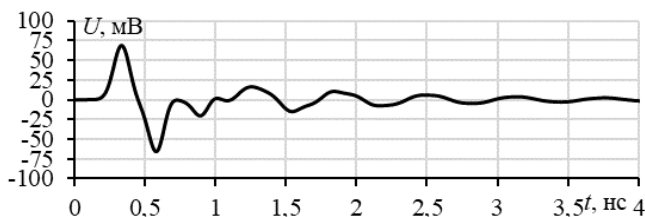


Рис. 3. Форма напряжения дальней перекрестной помехи для интегральной МПЛ в виде спирали

Исследование выполнено в рамках проекта FEWM-2024-0005 Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vo V.T. 3-D low-loss coplanar waveguide transmission lines in multilayer MMICs / V.T. Vo, L. Krishnamurthy, Q. Sun // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2006. – Vol. 54, No. 6. – P. 2864–2871.
2. Li F. Demonstration of the Hydrogen Passivated GaN HEMTs IC Platform // 2023 35th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). – 2023. – P. 99–102.
3. Lei C. Use of High Voltage OBIRCH Fault Isolation Technique in Failure Analysis of High Voltage IC's // 2019 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). – 2019. – P. 1–4.
4. Electromagnetic Compatibility (EMC). – Part 1–5: High Power Electromagnetic (HPEM) Effects on Civil Systems // IEC. 61000-1-5. – Ed: IEC. – 2004.

УДК 621.396.677.83

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ КОРПУСОМ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

*Г.М. Подхомутникова, инж.-исслед.; А.Ф. Лекарев, к.т.н.,
нач. лаб.; И.С. Костарев, к.т.н., нач. управления
г. Томск, АО «Научно-производственный центр «Полюс»,
gulyapodhomutnikova@gmail.com*

Представлена имитационная модель (ИМ) ослабления электромагнитных полей корпусом радиоэлектронной аппаратуры. ИМ получена на основе аналитических выражений и позволяет рассчитывать эффективность экранирования корпусом. ИМ может использовать-

ся на этапе проектирования аппаратуры для анализа электромагнитной совместимости.

Ключевые слова: имитационное моделирование, электромагнитное экранирование электрического поля, экранирование.

Для количественной оценки экранирования электромагнитного поля используется термин «эффективность экранирования» [1, 2], которая является функцией от частоты и определяется как отношение напряженности электрического поля без экрана к напряженности электрического поля, прошедшего через экран. Современные требования к электромагнитной совместимости диктуют необходимость учета не только базовых гармоник, но и широкополосных помех, включая высокочастотные компоненты [3–5]. Для корректного расчета ослабления электрического поля необходимо рассматривать ослабление сигнала во временной области, чтобы учесть высокочастотные фронты несинусоидального сигнала.

В связи с этим для моделирования экранирующих свойств корпуса радиоэлектронной аппаратуры требуются имитационные модели (ИМ) ослабления излучений с передаточной функцией, обратно пропорциональной эффективности экранирования всего спектра частот излучаемой помехи. Цель работы – построение имитационной модели электромагнитного экранирования для расчета ослабления сигнала во временной области.

Аналитические основы. Эффективность экранирования для электрического и магнитного полей [6] можно привести к виду

$$\mathcal{E}_E = \frac{(1 - K_{\text{гp}} f)^6}{K_E \sqrt[12]{f^{13}}}, \quad \mathcal{E}_H = \frac{(1 - K_{\text{гp}} f)^6}{K_H \sqrt[12]{f}}, \quad (1)$$

где $K_{\text{гp}}$ – коэффициент ограничения частоты экранирования, зависящий от максимального размера отверстия (щели) в корпусе; K_E , K_H – постоянные коэффициенты эффективности экранирования электрического и магнитного полей, зависящие от свойств материала корпуса, его размеров и толщины стенок.

Имитационная модель в SPICE. На рис. 1 показана RLC-модель экранирования электрического поля с параметрами $K_E = 2,408 \cdot 10^{12}$, $K_{\text{гp}} = 8,38 \cdot 10^{-11}$ (рис. 1, а), передаточная функция модели обратно пропорциональна $\mathcal{E}_E$ до частоты, где длина волны меньше размера отверстия, что подтверждается амплитудно-частотными характеристиками (рис. 2).

Для оценки работы ИМ на ее вход (V_IN_E) были поданы трапецидальный $V(TR_V_IN)$ и прямоугольный $V(PR_IN)$ сигналы ампли-

тудой 1 В (см. рис. 2, а), имитирующие излучение электрического поля от радиоэлектронной аппаратуры (см. рис. 2, б).

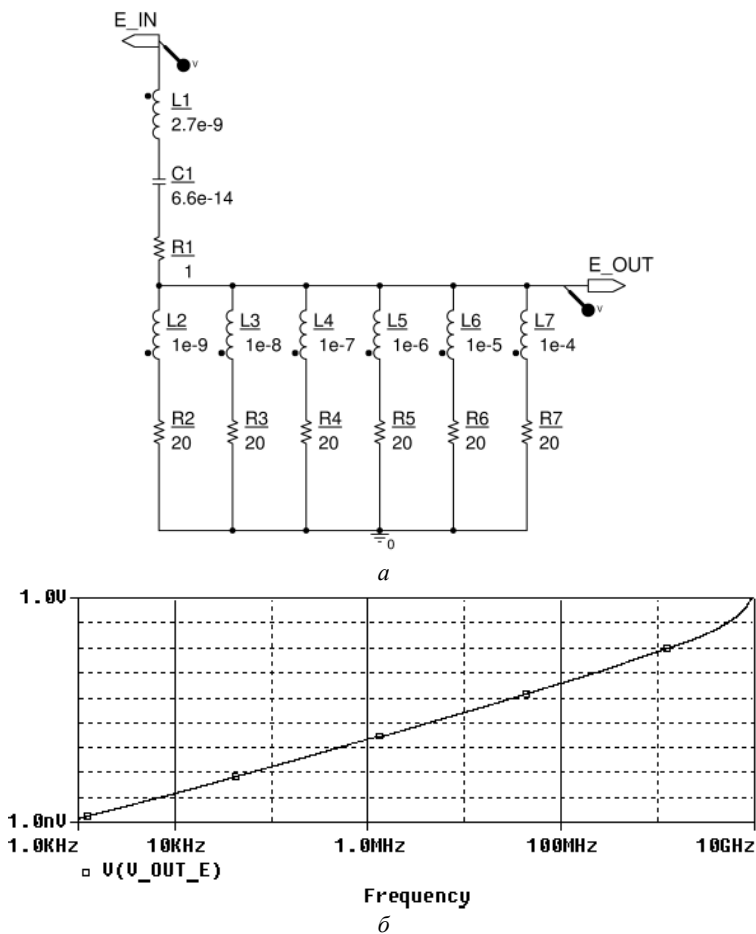


Рис. 1. ИМ экрана (а) и ее передаточная функция (б)

На рис. 3 показаны полученные на выходе ИМ временные диаграммы и частотные зависимости напряженности электрического поля.

Моделирование воздействия трапецидальным и прямоугольным сигналами (см. рис. 3) показало неравномерное ослабление напряженности электрического поля с одинаковым средним значением и разной скоростью нарастания и спада импульса.

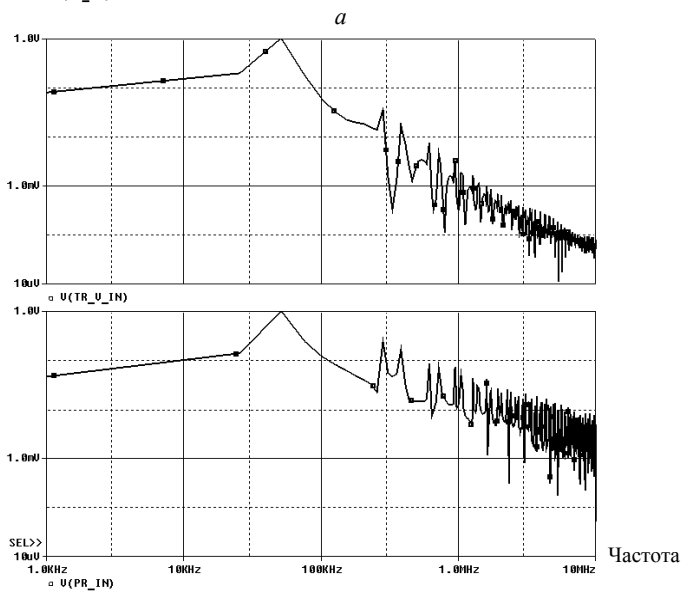
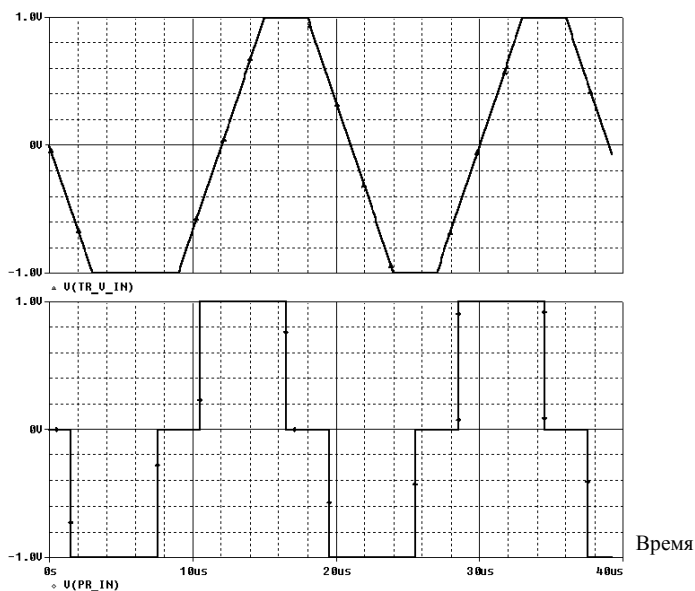
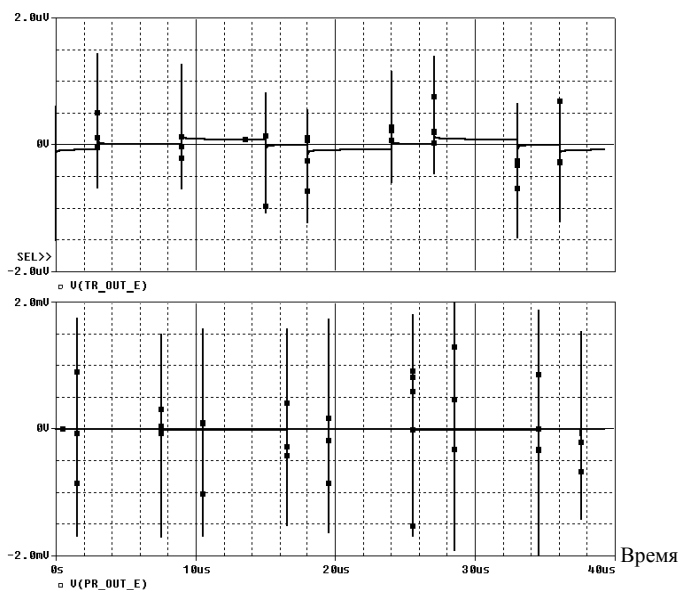
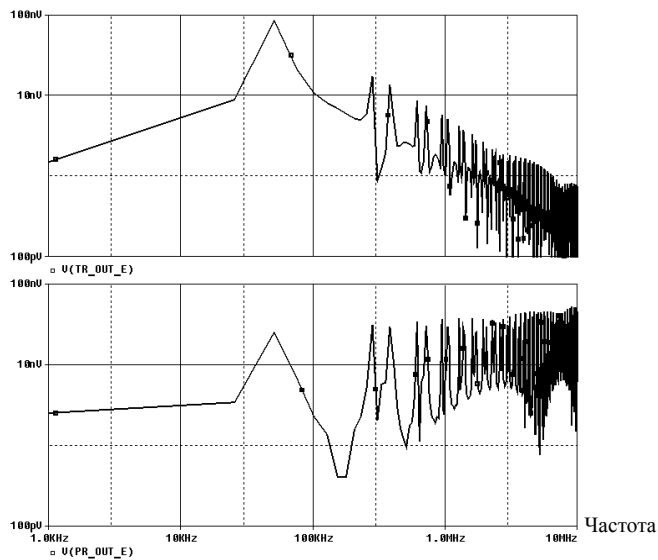


Рис. 2. Временные диаграммы (а) и частотные зависимости напряженности электрического поля (б) при воздействии трапецидального и прямоугольного сигналов на входе ИМ



a



б

Рис. 3. Временные диаграммы (*a*) и частотные зависимости напряженности электрического поля (*б*) при воздействии трапециoidalного и прямоугольного сигналов на выходе ИМ

Заключение. Результаты моделирования соответствуют теоретическому анализу, предполагающему, что напряженность электрического поля сигнала прямоугольной формы ослабляется хуже по сравнению с трапецидальным сигналом, что связано с более широким спектром высокочастотных гармоник.

Предложенная ИМ электромагнитного экранирования корпусом радиоэлектронной аппаратуры позволяет провести оценку ослабления напряженностей электрического и магнитного полей для всего спектра частот излучаемой помехи. Данная ИМ может быть использована на этапе проектирования аппаратуры при проектном анализе электромагнитной совместимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования. – Л.: Энергия, 1975. – 112 с.
2. Рогинский В.Ю. Экранирование в радиоустройствах. – Л.: Энергия, 1969. – 185 с.
3. Казанцев Ю.М. Проектный анализ электромагнитной совместимости регулирующей аппаратуры автономных систем электропитания / Ю.М. Казанцев, И.С. Костарев, А.Ф. Лекарев // Изв. Том. политех. ун-та. Энергетика. – 2010. – Т. 317, № 4. – С. 124–128.
4. Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами / пер. с англ. В.А. Исаакян; под ред. Б. Н. Файзулаева. – М.: Мир, 1990. – 242 с.
5. Газизов Т.Р. Электромагнитная совместимость и безопасность радиоэлектронной аппаратуры: учеб. пособие. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 254 с.
6. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1979. – 216 с.

ПОДСЕКЦИЯ 2.7

СВЕТОДИОДЫ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Председатель – Туев В.И., зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н., проф.;
зам. председателя – Солдаткин В.С., доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.

УДК 621.396.41

СИСТЕМА ФОТОБИОМОДУЛЯЦИИ

А.А. Иванова, студентка

Научный руководитель В.И. Туев, проф., д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, alisaivanova68039@gmail.com

Рассматриваются система фотобиомодуляции как метод лечения светом и существующие системы фотобиомодуляции, их преимущества и недостатки. Описана первая в России комната светолечения.

Ключевые слова: система светолечения, фотобиомодуляция, светодиодное освещение, циркадные ритмы.

Фототерапия, или светолечение, – это метод лечения с помощью света, используется свет определенной яркости и цветовой температуры для воздействия на организм человека через зрительный анализатор с целью достижения лечебного эффекта [1]. Свет с определенными характеристиками может активировать фоточувствительные клетки глаза, помогать в синхронизации циркадных ритмов, что имеет важное значение для регулирования цикла сон–бодрствование [2].

Системы фотобиомодуляции можно использовать для коррекции различных состояний: депрессий, нарушенного цикла сон–бодрствование, некоторых видов бесплодия, избыточной массы тела и др. [3] Существует два основных варианта систем фототерапии (светолечения): стационарная и мобильная:

– стационарные системы (комнаты): комната с достаточным количеством ламп для достижения необходимого уровня освещенности. Человек заходит в комнату на короткий промежуток времени, на него воздействует свет определенного уровня освещенности и цветовой температуры (подбирается лечащим врачом);

– мобильные системы (лампы): в такой системе используется одна или несколько ламп, помещенных в корпус в виде короба без одной

стенки. Человек находится лицом к этой конструкции на короткий промежуток времени [4].

Основные характеристики комнат фототерапии (светолечения):

- яркость: для достижения терапевтического эффекта используется яркость, достигающая 10000 лк [5];
- цветовая температура: играет важную роль, подбирается индивидуально лечащим врачом;
- продолжительность: длительность сеанса светотерапии зависит от индивидуальных потребностей человека, назначается лечащим врачом [6].

Преимущества светотерапии:

- безопасность: светотерапия является безопасным методом лечения и не имеет серьезных побочных эффектов [7];
- есть возможность установки такой системы в большинстве медицинских клиник.

На данный момент существует комната светолечения с высокой интенсивностью (не менее 2000 люкс в каждой точке комнаты) и несколькими режимами освещенности [8].

Комната создана на основе 36 ламп, которые используются в составе светильников с рассеивателем в виде поликарбоната. При этом лампы не являются диммируемыми, для изменения освещенности необходимо поочередно выключать ряды светильников [9].

Вывод: на основании изложенного материала имеет смысл разработки комнаты светолечения с освещенностью до 10000 лк, изменяемой яркостью, цветовой температурой и частотой пульсации света [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Светолечение: современные технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://medi.ru/info/240/>, свободный (дата обращения: 01.02.2025).
2. Человеко-ориентированное освещение – значение и применение циркадного освещения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://buck.lighting/ru/blog/человеко-ориентированное-освещение/>, свободный (дата обращения: 03.02.2025).
3. Изучение дифференциального воздействия фотобиомодуляции на сон и работоспособность [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ichgcp.net/ru/clinical-trials-registry/nct05116605>, свободный (дата обращения: 07.02.2025).
4. Современные технологии светолечения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tehnologii-svetolecheniya>, свободный (дата обращения: 01.03.2025).
5. 10,000 Lux for Light Therapy: What Does It Mean? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.alaskanorthernlights.com/blog/what-does-10000-lux-mean/>, свободный (дата обращения: 09.03.2025).

6. What is a 10,000 Lux Light Box? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://verilux.com/pages/10000-lux>, свободный (дата обращения: 11.03.2025).

7. Светотерапия и её место в жизни [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fgu-obp.ru/articles/interesnye-statii/svetoterapiya-i-eye-mesto-v-zhizni/>, свободный (дата обращения: 17.03.2025).

8. В Новосибирске появилась первая в России световая комната для лечения депрессий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://medportal.ru/mednovosti/v-novosibirske-roiyavilas-pervaya-v-rossii-svetovaya-komnata-dlya-lecheniya-depressiy/>, свободный (дата обращения: 22.03.2025).

9. Первая в России световая комната для лечения депрессий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://medportal.ru/mednovosti/v-novosibirske-roiyavilas-pervaya-v-rossii-svetovaya-komnata-dlya-lecheniya-depressiy/>, свободный (дата обращения: 03.03.2025).

10. Циркадное освещение поможет пациентам с биполярным расстройством [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://abclight.ru/blog/tpost/215ubvvy1-tsirkadnoe-osveschenie-pomozhet-patsient>, свободный (дата обращения: 02.03.2025).

УДК 004.353.254.5

ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫЙ LED-ДИСПЛЕЙ ДЛЯ СЛОЖНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

М.А. Аксенович, Р.С. Елсуков, В.С. Сафонов, студенты

Научный руководитель В.И. Туев, проф. каф. РЭТЭМ, д.т.н.

Проект ГПО – РЭТЭМ-2402. Светодиодный дисплей

г. Томск, TVCYP, redgeis2003@mail.ru

Рассматривается LED-дисплей, который совмещает дистанционное управление и возможность эксплуатации в сложных природных условиях. Анализируются современные технологии светодиодных экранов, их классификация по типу конструкции, размещению и методу установки светодиодов. Приведен обзор существующих решений на рынке. В статье предложена концепция нового LED-дисплея с возможностью управления через Wi-Fi модуль. Описаны ключевые компоненты для реализации, включая выбор контроллера, светодиодной матрицы и системы питания. Приведен план разработки, а также рассмотрены возможные области применения.

Ключевые слова: светодиодный дисплей, дистанционное управление, энергоэффективность, экстремальные условия.

В результате проведенного литературного обзора перечислены уже существующие аналоги, приведены их основные характеристики:

- **Divoom Pixoo-64:** пиксельный 64x64 LED-дисплей, предназначенный для отображения пиксельного искусства, управляемый через Wi-Fi [3];

- **SRyLED Poster LED Display:** мобильный постерный LED-дисплей с возможностью управления через 3G, 4G, Wi-Fi, USB и LAN [4];

- **Raptors LED Wi-Fi Panel:** многоцветная LED-панель с поддержкой Wi-Fi, позволяющая программировать отображаемый контент непосредственно с мобильного устройства [5].

На рис. 1 представлены решения, существующие на рынке.



Рис. 1. Существующие решения на рынке

Основной недостаток рассмотренных технических решений в данной статье: они не предназначены для применения в тяжелых погодных условиях.

Цель работы. Разработка дистанционно управляемого LED-дисплея, адаптированного для эксплуатации в сложных природных условиях, с использованием современных технологий и энергоэффективных решений.

Задачи первого этапа ГПО:

- планирование: цели, этапы, бюджет;
- 3D-модель: наброски, чертежи, визуализация;
- выбор деталей: определение компонентов;
- тестирование: работа с макетом на Arduino;
- разработка ПО: приложение или веб-интерфейс;
- презентация и документация: подготовка материалов.

Для решения этих задач был изучен обзор материалов по теме и проанализированы существующие решения на рынке; определены ключевые требования к LED-дисплею для сложных условий эксплуатации.

В России существует несколько крупных производителей светодиодных дисплеев, занимающихся разработкой и выпуском дисплеев.

Одним из лидеров отрасли является компания **DiMedia** (Тюмень) [1], основанная в 2004 г. и специализирующаяся на проектировании и производстве городской инфраструктуры.

Компания **Future Vision** [2], разрабатывающая свою продукцию с 2011 г., является производителем и поставщиком LED-экранов и медиафасадов в России.

Современные светодиодные экраны разделяются по типам:

- по технологии исполнения: кластерные и матричные;
- по размещению: наружные (с защитой от погодных условий) и интерьерные (для помещений);
- по типу светодиодов: DIP (яркие, для улицы) и SMD (компактные, для помещений);
- по наличию корпуса: корпусные и бескорпусные.

Разрабатываемый дисплей должен обладать следующими характеристиками:

- дистанционное управление – возможность управления дисплеем через Wi-Fi модуль;
- адаптация к экстремальным условиям – устойчивость к сложным погодным условиям.

Основные элементы дисплея:

- светодиодная матрица (например, P10, WS2812B);
- контроллер (ESP32 или STM32);
- зарядный контроллер MPPT/PWM;
- беспроводной модуль ESP8266 V3 CH340 Lua Wi-Fi.

LED-дисплеи применяются в дорожных и информационных табло; на промышленных объектах и складах; в энергоэффективной рекламе на стендах.

Выводы. В данной работе проведен анализ современных LED-дисплеев. Выбраны основные компоненты для разрабатываемого устройства. Разработан план действий, включая создание 3D-модели, тестирование и разработку программного обеспечения. Ожидается, что предложенный LED-дисплей обеспечит надежность и энергоэффективность в сложных условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Видеоэкраны. LED-экраны ДиМедиа [Электронный ресурс]. – URL: <https://o.di.media/ru/led-displays/> (дата обращения: 13.03.2025).
2. Производитель светодиодных экранов Future Vision [Электронный ресурс]. – URL: <https://future-vision.ru/> (дата обращения: 13.03.2025).
3. Умный информационный пиксельный дисплей Divoom Pixoo 64 [Электронный ресурс]. – URL: <https://biggeek.ru/products/umnyj-informacionnyj-displej-divoom-pixoo-64/> (дата обращения: 13.03.2025).

4. SKYLED LED display [Электронный ресурс]. – URL: <https://panelled-display.com/> (дата обращения: 13.03.2025).

5. All-in-One Flexible LED Display Raptor Series [Электронный ресурс]. – URL: https://www.huasuny.com/all-in-one-flexible-led-display-raptor-series_p53.html (дата обращения: 13.03.2025).

УДК 621.9.048.7:629.7.023

ОБЪЕДИНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ 3D-ПЕЧАТИ ДЛЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ

И.А. Блажих, студент каф. РЭТЭМ;

К.Д. Франк, студент каф. КУДР

*Научный руководитель В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, ilya.blagikh@yandex.ru*

Представлен новый подход, направленный на разработку высокотехнологичного производства авиакосмических деталей с использованием передовой технологии 3D-печати. Основное внимание уделено увеличению пространства печати с высоким разрешением, что позволит оптимизировать производственные процессы изготовления деталей.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивные технологии, авиакосмические детали, оптимизация производства, экономическая выгода.

Авиакосмическая отрасль всегда находилась на переднем крае технологических инноваций, стремясь расширить границы возможного в плане дизайна, производительности и эффективности [1]. Процессы аддитивного производства позволяют создавать физические объекты из цифровой информации по частям, строка за строкой, поверхность за поверхностью или слой за слоем. Это одновременно определяет геометрию объекта и свойства его материала [2]. Аддитивные технологии дают возможность производить и восстанавливать такие крупногабаритные изделия, как газовые турбины большой мощности и другие компоненты газотурбинных установок, детали насосного оборудования, крыльчатки охлаждения и пр. Все более широкое применение аддитивного производства в промышленности отвечает этим стремлениям, так как позволяет быстрее и проще внедрять новаторские разработки и модернизировать существующие продукты.

В последние десятилетия 3D-печать активно внедряется в авиакосмическую промышленность, что подтверждается ее использованием ведущими компаниями, такими как Boeing, Airbus, SpaceX и GE Aviation [4]. Например, GE Aviation уже применяет аддитивное произ-

водство для серийного выпуска топливных форсунок двигателей LEAP, что позволило сократить количество деталей с 20 до 1 и снизить массу на 25%. Однако большинство существующих систем 3D-печати ориентировано на изготовление деталей ограниченного размера (как правило, до 1 м³) [5].

Одним из недостатков существующих 3D-принтеров является их ограниченный размер рабочей области, что делает их непригодными для производства крупногабаритных деталей, необходимых в авиакосмической отрасли. Большинство современных 3D-принтеров рассчитано на печать небольших или средних деталей, что не соответствует потребностям авиационной промышленности, где часто требуются крупные компоненты, такие как элементы корпуса части двигателей. Это ограничение вынуждает искать новые решения для создания 3D-принтеров с увеличенной рабочей областью, способных производить детали большого размера без потери точности и качества. Проект направлен на устранение этого недостатка путем разработки 3D-принтера с увеличенным объемом печати, который сможет удовлетворить запросы авиакосмической отрасли (таблица).

Сравнение относительных характеристик технологий 3D-печати [3]

Характеристика	SLM	PBF	EBM	SLS	BJ	SLM и FDM
Точность	Высокая	Высокая	Ограничена	Ограничена	Низкая	Высокая
Рабочая камера	Малая ($< 0,5 \text{ м}^3$)	Малая	Крупная ($> 0,8 \text{ м}^3$)	Крупная	Большая	Средняя (1 м^3)
Скорость печати	Средняя	Низкая	Средняя	Средняя	Высокая	Средняя

Просматривая и анализируя источники, можно сделать вывод, что рынок активно запрашивает 3D-принтеры с большим пространственным объёмом печати. Это связано с растущими потребностями в производстве крупногабаритных деталей и конструкций в таких отраслях, как строительство, авиация, автомобиле- и судостроение.

Поэтому для решений таких проблем предполагается объединить существующие технологии 3D-печати, чтобы создать принтер, способный не только работать с большими объемами (примерно 1000×600×600 мм), но и обеспечивать высокую точность (по оси Z от 60–120 мкм), скорость и надежность. Такой подход позволит удовлетворить запросы рынка, предлагая универсальные устройства, которые смогут печатать как крупные, так и сложные детали с минимальными затратами времени и ресурсов. Для решения таких проблем можно объединить две технологии, такие как SLM и FDM.

Создать первый экструдер для производства прочного каркаса и опор, который будет изготавливаться из термостойкого пластика. Этот экструдер будет формировать подготовительную форму, необходимую для последующих этапов производства. Создать второй экструдер, способный равномерно распределять металлический порошок в соответствии с каркасом, созданным первым экструдером. Процесс будет осуществляться послойно: второй экструдер будет заполнять подготовленную форму металлическим порошком, после чего лазер будет спекать порошок на каждом слое, обеспечивая прочность и целостность конечного изделия.

В результате принтер должен обеспечивать высокое разрешение по оси Z (60–120 мкм), что критически важно для производства деталей с высокой точностью, особенно в авиакосмической отрасли, где требования к качеству и точности крайне высоки. Комбинация двух технологий 3D-печати – SLS (селективное лазерное спекание) и FDM (моделирование методом наплавления) – позволяет иметь размер рабочей камеры примерно 1000×600×600. Это позволяет объединить преимущества обеих технологий: FDM обеспечивает создание прочного каркаса и опор из термостойкого пластика, а SLS – точное распределение и спекание металлического порошка.

ЛИТЕРАТУРА

1. SLM-печать в авиастроении: часто задаваемые вопросы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blog.iqb.ru/slm-printing-aviation-faq/>, свободный (дата обращения: 12.03.2025).
2. Thompson M.K. et al. Design for Additive Manufacturing: Trends, Opportunities, Considerations, and Constraints // CIRP Annals. – 2016. – Vol. 65 (2). – P. 737–760.
3. Аддитивное производство в России и мире: подводим итоги года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blog.iqb.ru/3d-industry-2024-results/>, свободный (дата обращения: 12.03.2025).
4. 3D-технологии в развитии аэрокосмической промышленности Design for Additive Manufacturing: Trends, Opportunities, Considerations, and Constraints <https://blog.iqb.ru/3d-printers-efficiency-in-aerospace/>, свободный (дата обращения: 12.03.2025).
5. Технологии аддитивного производства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qbed.space/knowledge/blog/additive-manufacturing-technologies>, свободный (дата обращения: 12.03.2025).

ПОЛУПРОЗРАЧНЫЙ СВЕТОДИОДНЫЙ ДИСПЛЕЙ*А.А. Буймов, А.А. Иванова, студенты каф. РЭТЭМ**Научный руководитель В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.**г. Томск, ТУСУР, artembuiyomov@mail.ru*

Светодиодные экраны стали неотъемлемым элементом нашей повседневности, которые активно используются для размещения рекламы, трансляции информации на массовых мероприятиях и реализации интерактивных проектов. В связи с технологическим прогрессом на смену обычным экранам приходят полупрозрачные LED-панели, объединяющие в себе достоинства яркого изображения и сохранения частичной видимости за экраном. Данная статья написана с целью изучения принципов работы RGB-светодиодов, этапов создания на их основе светодиодных экранов, а также подробного разбора существующих конструкций полупрозрачных светодиодных дисплеев.

Ключевые слова: полупрозрачный дисплей, светодиоды, технологии отображения, реклама.

Основой любого светодиодного экрана являются RGB-светодиоды. Каждый такой светодиод состоит из трех элементов, излучающих красный, зеленый и синий свет. Регулируя интенсивность свечения каждого цвета, можно получить практически любой оттенок, включая белый. Именно смешение RGB-цветов позволяет создавать яркие и насыщенные изображения на светодиодных экранах [2]. Схемы RGB-светодиодов представлены на рис. 1.

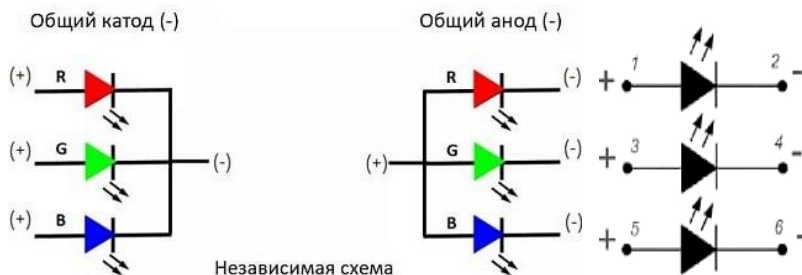


Рис. 1. RGB-светодиоды

Полупрозрачные светодиодные экраны создаются с использованием различных технологий, которые определяют их прозрачность, гибкость и область применения. Один из подходов – это матрицы на прозрачной подложке [3]. В этом случае светодиоды размещаются на

прозрачной подложке из листового прозрачного ПЭТ, обеспечивающего частичную прозрачность экрана. Пример такого экрана изображен на рис. 2.

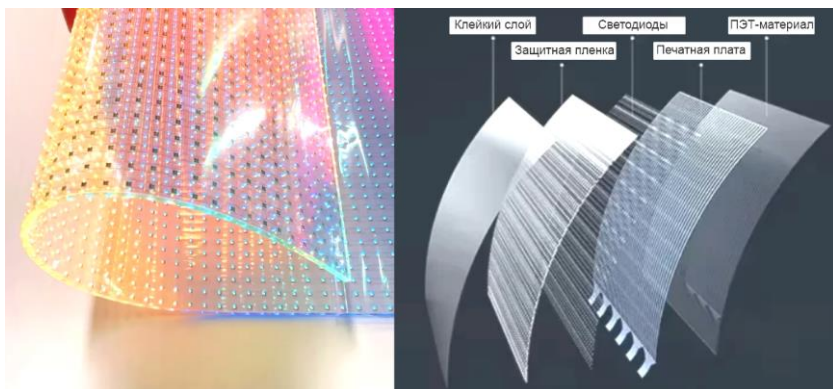


Рис. 2. Устройство полупрозрачного светодиодного экрана на RGB-светодиодах

Другой подход – это экраны на основе адресных светодиодов, таких как WS2812B. Эти светодиоды оснащены встроенными микроконтроллерами, что позволяет индивидуально управлять каждым светодиодом и упрощает создание сложных динамических эффектов [5]. Устройство адресного светодиода WS2812B показано на рис. 3.

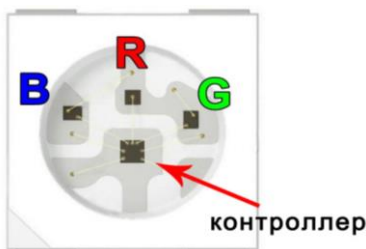


Рис. 3. Устройство адресного светодиода WS2812B

Существует два основных способа их применения. Первый – линейные экраны, где светодиоды монтируются на гибкие ленты, которые крепятся на жесткие линейки, например, из алюминия. Линейки располагаются параллельно с зазорами, определяющими степень прозрачности. Преимущества этого метода – гибкость конструкции и простота монтажа. Пример такого экрана изображен на рис. 4.



Рис. 4. Устройство полупрозрачного светодиодного экрана на светодиодах WS2812B

Второй способ – медиафасады на сетке, где светодиоды размещаются в узлах сетки из тросов или других прочных материалов. Преимущества такого решения – высокая прозрачность, устойчивость к ветровым нагрузкам и возможность создания крупных экранов, однако монтаж сложнее, а стоимость выше. Пример такого экрана изображен на рис. 5.

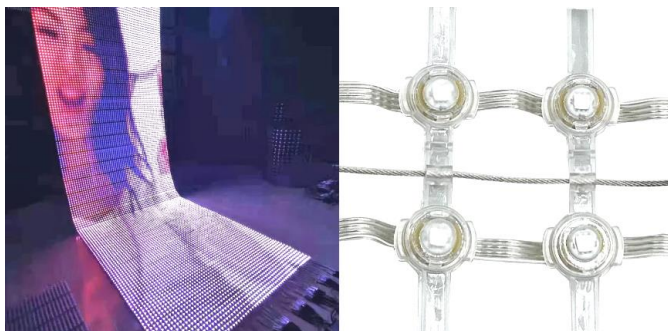


Рис. 5. Устройство полупрозрачного светодиодного экрана на светодиодах WS2812B

Полупрозрачные светодиодные экраны находят применение в различных сферах благодаря своей универсальности и визуальной привлекательности. В архитектурном освещении они используются для интеграции в фасады зданий, создавая динамичные световые инсталляции, которые подчеркивают архитектурные особенности. В рекламе такие экраны применяются в витринах магазинов, привлекая внимание покупателей, не блокируя обзор товаров.

В сценическом дизайне они позволяют создавать эффектные декорации для концертов, театральных постановок и других мероприятий. В транспорте полупрозрачные экраны используются как инфор-

мационные дисплеи на остановках, в аэропортах и на вокзалах. Кроме того, они находят применение в интерактивных инсталляциях, например, в музеях, на выставках и в общественных пространствах, где создают интерактивные экспозиции.

В заключение можно сказать, что полупрозрачные светодиодные экраны представляют собой перспективную технологию, сочетающую визуальную привлекательность с функциональностью. Благодаря разнообразию конструктивных решений они находят применение в архитектуре, рекламе, сценическом дизайне и других областях. Дальнейшее развитие технологий управления светодиодами и материалов для подложек позволит улучшить характеристики таких экранов и расширить их возможности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Звонарев С.В. Основы математического моделирования: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 112 с.
2. Пихтин А.Н. Квантовая и оптическая электроника. – СПб.: Абрис, 2012. – 656 с.
3. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ.; под ред. А.Э. Юновича. – М.: Физматлит, 2008. – 2-е изд. – 496 с.
4. Бугров В.Е. Оптоэлектроника светодиодов: учеб. пособие / В.Е. Бугров, К.А. Виноградова. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 174 с.
5. Юшин А.М. Современные светодиоды: справочник. – М.: Радиософт, 2013. – 384 с.

УДК 627.71

ВНЕДРЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ФУНКЦИОНАЛА ДЛЯ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ ОГНЕЙ

В.А. Мильто, Т.А. Тарасенко, студенты

Научный руководитель В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.

Проект ГПО РЭТЭМ-2302. Печатный узел плавучего

навигационного огня

г. Томск, ТУСУР, grifon.run@mail.ru

Рассматриваются перспективные направления расширения функционала печатных узлов, применяемых в плавучих навигационных огнях. Особое внимание уделено интеграции новых технологий, таких как IoT, для повышения автономности, надежности и безопасности навигационных систем. Приведены результаты анализа современных разработок и предложены пути их дальнейшего совершенствования.

Ключевые слова: плавучие навигационные огни, печатные узлы, навигационные системы, светодиоды, IoT, энергоэффективность.

Цель работы – проанализировать современный функционал печатных узлов, используемых в плавучих навигационных огнях, для определения их функциональных возможностей, инновационных решений и перспектив внедрения в практику судоходства.

Задачи работы:

1. Изучить функциональные возможности печатных узлов в плавучих навигационных огнях, включая управление световыми сигналами, энергоснабжение и цифровизацию.
2. Проанализировать схмотехнические решения, направленные на повышение эффективности и надежности навигационных систем.
3. Оценить перспективы внедрения современных печатных узлов в практику судоходства, учитывая такие аспекты, как автономность, долговечность и интеграция с IoT.

Плавучие навигационные огни (буи, бакены) являются важным элементом обеспечения безопасности судоходства. Современные требования к автономности, энергоэффективности и цифровизации стимулируют развитие технологий нового поколения. Одним из ключевых компонентов таких систем является внедрение нового функционала для печатных узлов (плат), обеспечивающее управление и интеграцию с внешними системами.

Были изучены:

1. Функциональные возможности печатных узлов в плавучих навигационных огнях.
2. Схмотехнические решения, повышающие эффективность систем.
3. Перспективы внедрения разработок в практику судоходства.

Печатные узлы в современных плавучих навигационных огнях выполняют следующие функции [1]:

1) **управление световыми сигналами:** использование светодиодов (LED) под управлением микроконтроллеров позволяет реализовать различные режимы свечения (например, проблесковый). Это повышает видимость и снижает энергопотребление в 3–5 раз по сравнению с лампами накаливания;

2) **энергоснабжение:** платы интегрируются с солнечными панелями и аккумуляторами, обеспечивая автономность до 6 месяцев без обслуживания;

3) **цифровизация:** внедрение модулей связи (AIS, GPS) позволяет передавать данные о положении и состоянии буя в реальном времени.

Примером инноваций служат разработки компании Sabik Marine, где многослойные печатные платы обеспечивают срок службы световых систем до 15 лет. В России подобные технологии развиваются в рамках проектов ГПО ТУСУРа, например, для спутникового мониторинга навигационных объектов [2].

По анализу полученных результатов было выявлено, что применение печатных узлов повышает надежность и снижает эксплуатационные затраты благодаря автономности и долговечности. Технология печатных узлов позволит внедрить дополнительный функционал таких как дистанционное управление, система GPS.

Это может сократить количество аварий на 10–15% в условиях плохой видимости [4].

При этом дополнительно потребуются решить технологические задачи:

- защита от коррозии в морской среде требует дополнительных покрытий;
- кибербезопасность подключенных систем нуждается в доработке.

Заключение. В ходе исследования были решены задачи: определение ключевых функций печатных узлов, таких как управление светодиодными сигналами, обеспечение энергоснабжения через солнечные панели и аккумуляторы, а также интеграция с модулями связи (AIS, GPS) для передачи данных в реальном времени.

Выявлены технологические инновации, включая многослойные печатные платы, которые увеличивают срок службы систем до 15 лет, и решения для защиты от коррозии в морской среде.

Установлены перспективы дальнейшего развития, такие как усиление мер кибербезопасности подключенных систем.

Результаты работы подтверждают, что современные печатные узлы значительно повышают надежность и энергоэффективность навигационных огней, сокращая эксплуатационные затраты на 20–30%. Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование устойчивости к внешним воздействиям и разработку стандартов для безопасной интеграции с IoT.

ЛИТЕРАТУРА

1. Marko Group. Судовое навигационное оборудование: виды и применение в современном мореплавании [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://markogroup.com>, свободный (дата обращения: 01.03.2025).

2. ТУСУР, новости [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://tusur.ru/ru/novosti-i-meropriyatiya/novosti/prosmotr/-/novost-tusur-i-niipp-razrabotali-sistemu-monitoringa-i-upravleniyami-navigatsionnymi-ognyami-narekah>, свободный (дата обращения: 01.03.2025).

3. Sabik Marine. LED Navigation Lights Specifications [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://sabik-marine.com>, (свободный (дата обращения: 01.03.2025).

4. IALA Guidelines on Smart Buoys [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://iala-aism.org>, свободный (дата обращения: 01.03.2025).

ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СВЕТОИЗЛУЧАЮЩЕМ ДИОДЕ

Н.А. Репников, А.В. Пономарева, студенты каф. РЭТЭМ

Научный руководитель В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.

Проект ГПО РЭТЭМ-2402. Светодиодный дисплей

г. Томск, ТУСУР, aponomareva1700@gmail.com,

kolya20052018@gmail.com

Обсуждаются органические полимерные материалы, а также процессы их печати. Описана структура органических светодиодов, получаемых на основе полимеров. В заключение приведена таблица с характеристиками обсуждаемых полимерных материалов.

Ключевые слова: светодиод, полимер, органическая электроника, принтерная печать, методы печати, органические полимерные материалы, PLED, светоизлучающий диод, многослойная структура.

В наше время очень быстро набирает популярность органическая электроника, а вместе с этим и органические полимерные материалы. Среди многообразия полимеров особое место занимает поли(9,9-диоктил)флуорен. Он характеризуется высокой термо- и химической стойкостью. Сополимеры на его основе также представляют интерес, поскольку их оптические и электрические характеристики можно легко контролировать в процессе синтеза [2]. В производстве светодиодов на основе сопряжённых полимеров (PLED) активно используются такие электролюминесцентные материалы, как полифлуорен и полифениленвинилен. Второй представляет собой полимер с высокой степенью кристаллизации, который просто получить в чистом виде. Ему свойственны стабильные электрические характеристики [3]. Также проявляет хорошие свойства в светоизлучающих диодах сопряжённый полимер, состоящий из карбазола и циклопентадитиофена. Этот полимер обладает оптимальной молекулярной структурой, определяющей его высокую стабильность и зарядово-транспортные свойства [4].

Изучение материалов по этой теме дало возможность систематизировать информацию о полимерных органических материалах и их характеристиках, поскольку доступные данные о таких материалах и их применении разнообразны и зачастую противоречивы.

Основу многослойной структуры светодиода на основе полимерных материалов составляет стеклянная подложка. На неё наносится прозрачный и электропроводящий слой, выполняющий функцию анода. Чаще всего для этого используется оксид индия-олова (ITO). Далее следует слой органического полимера, а в конце наносится алюми-

евый слой (Al) с низкой работой выхода [5]. Схематическое изображение структуры светодиода представлено на рис. 1.

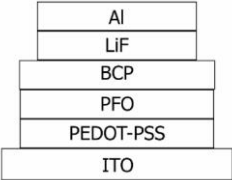


Рис. 1. Многослойная структура светодиода

В основном органические материалы наносятся методом рулонной печати. Для прямой интеграции различных органических покрытий потребовалось бы нанесение нескольких органических слоев. Однако это затруднительно из-за их особых характеристик, а именно чувствительность ко многим растворителям. Использование печатных технологий для создания устройств органической электроники, таких как транзисторы, диоды и дисплеи, является перспективным направлением. Этот способ может соперничать с традиционными методами, такими как центрифугирование и трафаретная печать.

Основное достоинство печатной технологии – это её экономичность. Однако при использовании печати возникает проблема: необходимо разработать состав чернил, который будет соответствовать множеству требований. Например, вязкость, поверхностное натяжение, температура кипения растворителей и другие характеристики. Но многие требования уже можно преодолеть, например, можно легко оптимизировать вязкость путем введения различных загустителей [6].

На основе исследований полимерных материалов и их характеристик была составлена таблица, в которой также отражена структура светодиода [7].

Характеристики светодиодов на основе полимерных материалов

Материал	Структура	Плотность тока, мА/см ²	Яркость, кд/м ²	Эффективность по току, кд/А
Бифенилдиамина	ITO/HIL/HTM1/EML/Alq3/LiF/Al	39,01	2 383,2	6,11
9,9-бис-(4-дифениламинофенил) флуорена	ITO/PEDOT/P4/PFPO/LiF/Al	13,2	639	0,89
Фенилнафтилдиамин	ITO/HIL/HTM2/EML/Alq3/LiF/Al	53,54	4 561,6	8,52

ЛИТЕРАТУРА

1. Многослойные светоизлучающие диоды на основе органических полупроводниковых полимеров / Р.М. Гадиров, А.В. Одоод, А.Е. Курцевич, Д.М. Ильгач, А.В. Якиманский, Т.Н. Копылова // Изв. высш. учеб. завед. (Томск). – 2018. – 158 с.
2. Stephen R.F. The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic // Nature. – 2004. – Vol. 428. – P. 911–918.
3. Бочкарев М.Н., Витухновский А.Г., Каткова М.А. Органические светоизлучающие диоды (OLED) / М.Н. Бочкарев, А.Г. Витухновский, М.А. Каткова. – М.: Деком, 2011. – 359 с.
4. Пат. 2 568 489 РФ, МПК С 08 G 75/00. Сопряженный полимер на основе карбазола и цикlopентадитиофена и его применение в качестве электро-электролюминесцентного материала в органических светоизлучающих диодах / А.В. Аккуратов (РФ). – № 2 013 139 993/ 05; заявл. 29.08.13; опубл. 20.11.15. Бюл. № 32. – 3 с.
5. Сапожникова Е.В. OLED-устройства на основе органических полимеров. – Томск: НИ ТГУ, 2019. – 117 с.
6. Сим П.Е. Исследование метода струйной печати для производства OLED-панелей и светодиодов / П.Е. Сим, А.В. Васильев, В.И. Юрченко // Вестник науки Сибири (Томск). – 2012. – 93 с.
7. Васильев С. Технологические материалы для производства органических светодиодов // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – № 3. – 28 с.

УДК 681.5.08

СИСТЕМА ОТСЛЕЖИВАНИЯ ЗАНЯТОСТИ ТУАЛЕТНОЙ КАБИНКИ «ПРИПУДРИТЬ НОСИК»

***Е.С. Урин, С.Е. Пивоваров, М.Ю. Сокольников, студенты ИЯТШ
г. Томск, НИ ТПУ, esu9@tpu.ru***

Представлена система отслеживания занятости туалетной кабинки, в основе конструкции которой лежит устройство детектирования присутствия объекта (человека), собранное с применением ИК-диода и ИК-приёмника. Для оповещения пользователя разработанной системы используется Telegram-бот, связанный с устройством детектирования посредством модуля ESP.

Ключевые слова: туалетная кабинка, система отслеживания, ИК-диод, ИК-приёмник, Arduino, Telegram-бот.

Проект системы отслеживания занятости туалетной кабинки «Припудрить носик» создан на базе платформы Arduino. Целью разработки являлось создание устройства, позволяющего отслеживать занятость туалетных кабинок через телефон для сокращения времени на проверку свободных мест. К разрабатываемой системе были предъявлены следующие требования:

– система оповещения должна быть организована в виде Telegram-бота, присылающего уведомление о занятости туалетной кабинки в случае, если ИК-луч не достиг приёмника [1, 2];

– устройство детектирования должно обеспечивать стабильную работу системы в кабинке с габаритными размерами 150×180 см в условиях изменяющегося уровня освещённости, соответствующего разному времени суток.

Элементный состав аппаратной части разработанной системы включает в себя микроконтроллер ESP32WROOM, ИК-диод L-34F3C, ИК-приёмник BRM1050, Wi-Fi модуль ESP8266 [3, 4].

Устройство детектирования построено по принципу углового отражателя для ИК-луча. В зависимости от того, достиг ли ИК-луч приёмника, Telegram-бот формирует одно из двух сообщений:

- 1) «Занято», если ИК-луч не достиг приёмника;
- 2) «Свободно», если ИК-луч достиг приёмника.

В качестве источника питания используется 9v-adapter, подключенный к плате через понижающий DC-DC-преобразователь. Схема электрическая принципиальная приведена на рис. 1.

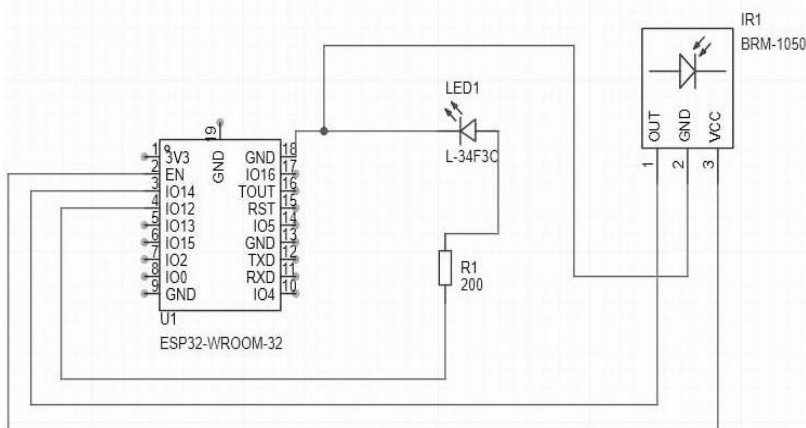


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная аппаратной части системы отслеживания занятости туалетной кабинки

ИК-диод и ИК-приёмник должны располагаться в одной плоскости входа в туалетную кабинку по разным её углам напротив сортира так, чтобы луч, формируемый ИК-диодом, отражаясь от туалетного бачка, поступал в ИК-приёмник. ИК-приёмник и ИК-диод из-за разных факторов могут менять своё положение. Во избежание этого должен быть создан жесткий корпус для элементов, надежно закреп-

ленный на стене. Предлагаемая схема расположения устройства детектирования в кабинке с заданными габаритами показана на рис. 2.

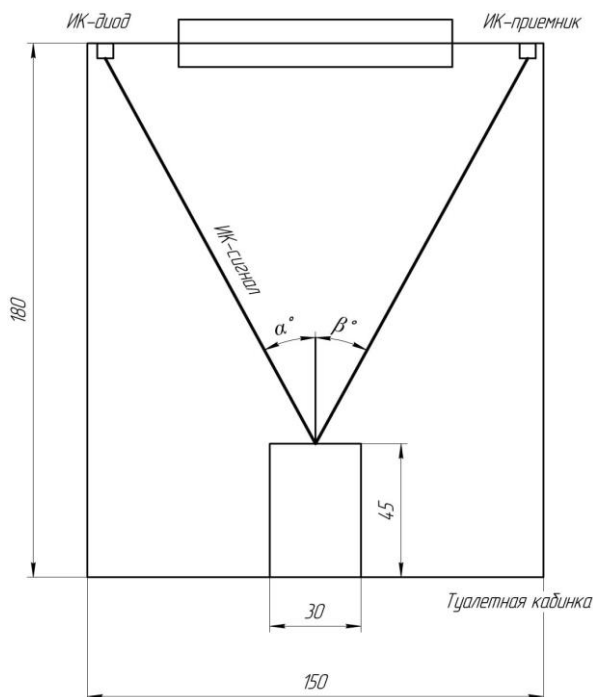


Рис. 2. Схема расположения устройства детектирования в кабинке

В рамках экспериментальной проверки работоспособности системы было проведено несколько опытов, которые показали, что:

- система работает одинаково корректно в условиях изменяющейся освещённости;
- система работает корректно при изменении ширины кабинки в диапазоне 1–2,5 м, что удовлетворяет средним размерам туалетной кабинки в общежитии (стандартная ширина 1,5 м), при этом оптимальный угол направления ИК-луча от ИК-диода изменяется в зависимости от отдаленности отражаемой поверхности от плоскости расположения ИК-диода и ИК-приёмника.

ЛИТЕРАТУРА

1. GitHub – CasaJasmina/TelegramBot Library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/CasaJasmina/TelegramBot-Library>, свободный (дата обращения: 14.03.2025).

2. Взаимодействие с ботом Telegram с помощью Arduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://microkontroller.ru/arduino-projects/vzaimodejstvie-s-botom-telegram-s-pomoshhyu-arduino/>, свободный (дата обращения: 14.03.2025).

3. ESP8266WiFi library [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arduino-esp8266.readthedocs.io/en/latest/esp8266wifi/readme.html>, свободный (дата обращения: 14.03.2025).

4. GitHub – Arduino/libraries/ESP8266WebServer at master [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/esp8266/Arduino/tree/master/libraries/ESP8266WebServer>, свободный (дата обращения: 14.03.2025).

РОБОТОТЕХНИКА

*Председатель – Коцубинский В.П., доцент каф. КСУП, к.т.н.;
зам. председателя – Шандаров Е.С., ст. преп. каф. ЭП*

УДК 681.3

МАНИПУЛЯТОР НА БАЗЕ ARDUINO MEGA 2560

*Т.В. Ветров, А.Д. Тюлькин, А.В. Фатеев, Ю.Р. Ананин, студенты
Научный руководитель В.П. Коцубинский, доцент каф. КСУП, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, kvp@kcup.tusur.ru*

Представлена разработка манипулятора на базе платформы Arduino MEGA 2560. Манипулятор оснащён пятью сервоприводами, управляемыми через 12-битный ШИМ-контроллер PCA9685, что позволяет выполнять точные манипуляции с объектами. Описаны основные компоненты манипулятора, включая основание, металлическую раму, цилиндрическую деталь и механическую «клешню». Рассмотрены особенности программирования и управления сервоприводами, а также возможность интеграции манипулятора в мобильные робототехнические системы.

Ключевые слова: манипулятор, Arduino MEGA 2560, сервоприводы, ШИМ-контроллер PCA9685, робототехника, автоматизация.

Манипуляторы – это устройства, способные выполнять различные операции с объектами и представляющие собой механические «руки» или «клешни». Они могут как управляться в ручном режиме, так и выполнять задачи автоматически посредством алгоритмов.

Такие устройства используются как на неподвижной, так и на мобильной платформе в качестве части роботов или специальных транспортных средств. Они необходимы в ситуациях, где работа человека затруднена или сопряжена с риском. Манипуляторы используются в различных сферах и условиях, например, на заводах, складах, в медицине, при ликвидации аварий и даже для обезвреживания взрывных устройств. Они способны выполнять задачи различной сложности – например, собирать конструкции, сортировать предметы, выполнять точные манипуляции или работать с хрупкими материалами. С развитием технологий они совершенствуются, открывая новые возможности для автоматизации и повышения безопасности.

В данной работе был запрограммирован манипулятор.

Описание платформы. Данная платформа представляет собой манипулятор, оснащённый отладочной платой Arduino MEGA 256 на базе микроконтроллера ATmega2560, 5 сервоприводами для управления манипулятором, подключенными к модулю на базе 12-битного ШИМ-контроллера PCA9685.

Работа с манипулятором. Основными частями манипулятора являются основание, металлическая рама и цилиндрическая деталь, являющиеся плечами манипулятора, а также механическая «рука», она же «клешня». «Клешня» крепится к цилиндрической детали, цилиндрическая деталь может поворачиваться вокруг своей оси и крепится к металлической раме, которая уже в свою очередь крепится к основанию.

Модуль PCA9685 управляется посредством интерфейса I2C, к которому подключены пять сервоприводов, каждый из которых отвечает за свою функцию: один сервопривод отвечает за поворот основания манипулятора, два привода отвечают за положение «клешней» относительно основания (ближе или дальше и выше или ниже), ещё один отвечает за поворот цилиндрической детали вокруг её оси и последний привод отвечает непосредственно за сжатие или разжатие «клешней». На рис. 1 изображена модель взаимодействия между компонентами манипулятора.

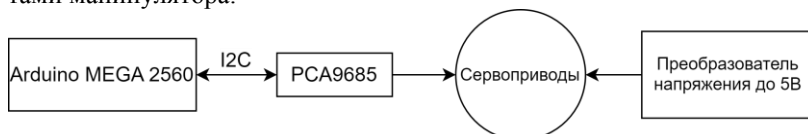


Рис. 1. Схема взаимодействия между компонентами манипулятора

Протокол взаимодействия с модулем, содержащий использованный регистры, представлен на рис. 2.

Регистры чипа PCA9685:

Названия регистров	Адрес	Данные регистров							Доступ	Примечание
		7 бит	6 бит	5 бит	4 бит	3 бит	2 бит	1 бит		
LEDO_ON	L 0x06							младшие 8 бит	R/W	LED 0
	H 0x07	0	0	0	FULL_ON			старшие 4 бита		
LEDO_OFF	L 0x08							младшие 8 бит	R/W	LED 0
	H 0x09	0	0	0	FULL_OFF			старшие 4 бита		
LED1_ON	L 0x0A							младшие 8 бит	R/W	LED 1
	H 0x0B	0	0	0	FULL_ON			старшие 4 бита		
LED1_OFF	L 0x0C							младшие 8 бит	R/W	LED 1
	H 0x0D	0	0	0	FULL_OFF			старшие 4 бита		
LED2_ON	L 0x0E							младшие 8 бит	R/W	LED 2
	H 0x0F	0	0	0	FULL_ON			старшие 4 бита		
LED2_OFF	L 0x10							младшие 8 бит	R/W	LED 2
	H 0x11	0	0	0	FULL_OFF			старшие 4 бита		

Рис. 1. Протокол взаимодействия с PCA9685

Однако перед управлением сервоприводами необходимо узнать о диапазоне пульсаций, так как Arduino посылает команду на модуль PCA9685, а тот посылает сигнал ШИМ на сами сервоприводы. Диапазон пульсаций потом переводится в диапазон рабочей зоны сервопривода. Так как были использованы разные сервоприводы, то это необходимо сделать для каждого сервопривода для их нормальной градуировки.

Были подобраны тайминги для каждого из сервоприводов в соответствии с техническими характеристиками сервоприводов.

Также стоит отметить, что подобная широтно-импульсная модуляция может использоваться и на моторах постоянного тока, что позволит в будущем установить данный манипулятор на робота, способного перемещаться на колёсах.

Заключение. Манипулятор может быть использован в различных сферах, включая промышленность, медицину и ликвидацию аварий. Его способность выполнять точные манипуляции делает его полезным для задач, требующих высокой точности, таких как сборка мелких деталей или работа с хрупкими материалами. В будущем планируется усовершенствование манипулятора путём добавления дополнительных сервоприводов и интеграции его в мобильную платформу, что расширит его функциональные возможности.

Результаты работы могут быть использованы для создания более сложных роботизированных устройств, способных выполнять задачи в различных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Техническая информация о плате контроля сервоприводами [Электронный ресурс]. – URL: https://micro-pi.ru/wp-content/uploads/2018/03/PCA9685_ru.pdf?ysclid=m7rv2urkh3900382902 (дата обращения: 28.02.2025).
2. Шестеров И.А. Робототехническая платформа с механическим манипулятором на базе Arduino Mega 2560 // Матер. конф. «Научная сессия ТУСУР–2018»: в 3 ч. – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч. 1. – С. 141–145.
3. Техническая информация о плате Arduino Mega 2560 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.farnell.com/datasheets/3969707.pdf> (дата обращения: 28.02.2025).

ПРАКТИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О МАКСИМАЛЬНОМ ПОТОКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ДИНИЦА

Д.А. Осипенко, В.А. Боцман, студенты;

В.П. Коцубинский, доцент каф. КСУП, к.т.н.

Научный руководитель А.А. Изюмов, ст. преп. каф. КСУП

г. Томск, ТУСУР, viktoria.botsman@icloud.com,

anton.izyumov@gmail.com, kvp@kcup.tusur.ru

Рассматривается алгоритм Диница как эффективный метод решения задачи нахождения максимального потока в транспортных сетях. Подробно описаны теоретические основы алгоритма, его применение в решении инженерных задач и использование в образовательном процессе для студентов технических специальностей.

Ключевые слова: алгоритм Диница, математика, теория графов.

Современный образовательный стандарт высшего профессионального образования требует от выпускников технических вузов не только теоретических знаний, но и практических навыков в применении различных алгоритмов для решения инженерных задач. Одним из таких алгоритмов является алгоритм Диница [1], предназначенный для нахождения максимального потока в транспортных и коммуникационных сетях.

Основной идеей алгоритма является использование уровневых графов и блокирующих потоков [2]. Сначала алгоритм строит уровневый граф, где вершины разбиваются на уровни в зависимости от их расстояния от источника, а затем используется метод поиска в глубину для нахождения блокирующих потоков. Эти блокирующие потоки являются потоками, которые невозможно увеличить без уменьшения потока по другим путям. После нахождения блокирующего потока обновляются пропускные способности рёбер, и процесс повторяется до тех пор, пока не будет найдено больше возможных путей.

Процесс алгоритма можно разделить на несколько ключевых этапов:

1. Построение уровня графа. Для этого используется поиск в ширину (BFS), который находит кратчайшие пути от источника до стока.

2. Поиск блокирующих потоков. Используется поиск в глубину (DFS) для нахождения блокирующих потоков в пределах уровня графа.

3. Обновление сети. После нахождения блокирующего потока обновляются пропускные способности рёбер.

Повторение этих шагов до тех пор, пока в графе существуют пути от источника к стоку.

Алгоритм Диница значительно эффективнее алгоритма Форда–Фалкерсона при работе с графами, в которых количество рёбер значительно больше, чем количество вершин.

Применение алгоритма Диница широко распространено в различных областях, включая транспортные сети, телекоммуникации и автоматизированные системы управления. Он используется для оптимизации распределения потоков в сетях, анализа пропускной способности рёбер и нахождения минимальных разрезов.

В частности, алгоритм находит свое применение в следующих областях:

1. Транспортные и логистические сети. Алгоритм позволяет моделировать и оптимизировать распределение потоков в сети, учитывая ограничения по пропускной способности.

2. Телекоммуникации. Используется для оптимизации распределения каналов связи и управления трафиком в сетях.

3. Энергетика. Применяется для анализа потоков энергии в распределительных системах.

Использование алгоритма Диница в учебном процессе имеет особое значение для студентов технических специальностей. Он помогает лучше понять теорию графов и сетевых моделей, а также развивает навыки решения задач оптимизации, что важно для будущих специалистов в области информационных технологий и системного анализа.

Применение алгоритма в рамках учебного процесса способствует развитию:

1. Навыков программирования. Студенты учатся разрабатывать и реализовывать алгоритмы на практических занятиях и лабораторных работах.

2. Навыков системного мышления. Понимание работы алгоритмов, таких как Диница, развивает способность решать сложные задачи и оптимизировать процессы.

3. Анализа алгоритмов и оптимизации. Студенты учат не только теоретические аспекты, но и практическое применение алгоритмов в реальных задачах.

4. Для студентов, изучающих алгоритмы и структуры данных, использование алгоритма Диница помогает углубить знания о работе с графами и эффективно решать задачи поиска максимального потока в различных приложениях. Разработка программных решений для автоматизации этих процессов позволяет студентам на практике освоить ключевые аспекты алгоритмической теории [3].

Заключение. Алгоритм Диница является эффективным инструментом для нахождения максимального потока в сети, позволяя решать задачи, связанные с оптимизацией потоков и анализом пропускной способности. Применение данного алгоритма имеет важное значение для образовательного процесса, поскольку помогает студентам технических специальностей развивать как теоретические знания, так и практические навыки, необходимые для решения сложных инженерных задач.

Внедрение алгоритма Диница в учебный процесс способствует развитию профессиональных компетенций, необходимых для работы с графовыми алгоритмами и сетевыми моделями. Эти знания и навыки находят широкое применение в таких областях, как системный анализ, информационные технологии, проектирование транспортных и телекоммуникационных сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кормен Т.Х. Алгоритмы: построение и анализ / Т.Х. Кормен, Ч.Е. Лейзерсон, Р.Л. Ривест. – М.: МЦНМО, 2020. – 1328 с.
2. Диниц Е.А. Алгоритмы нахождения максимального потока в сети // Дискретная математика. – 1970. – Т. 11. – С. 65–78.
3. Жигалова Е.Ф. Развитие профессиональных компетенций студентов инженерных специальностей / Е.Ф. Жигалова, М.В. Крыгина // Перспективы развития науки и образования: сб. науч. тр. – Тамбов, 2021. – С. 75–78.

УДК 656.052.2

АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПСЕВДОШУМОВЫХ СИГНАЛОВ

В.С. Дорофеев, студент

*Научный руководитель В.В. Егоров, ст. преп. каф. 408
г. Москва, МАИ, dorofeevvaldimx@yandex.ru*

Исследование посвящено разработке методов точного определения координат позиционируемых объектов внутри помещений с использованием акустических волн в качестве альтернативы радиосигналам. На подвижной роботизированной платформе размещается устройство, оснащенное микрофоном, а в помещении располагается созвездие маяков, излучающих звуковые сигналы. Система функционирует на основе базовых принципов глобальных навигационных систем. Замена радиосигналов звуковыми связана со значительной экономической выгодой, так как требования к передаточному оборудованию сильно снижаются с точки зрения необходимой вычислительной мощности. Особенность системы за-

ключается в использовании псевдощумовых звуковых сигналов, что позволяет не мешать работе персонала на объекте, где развернута система позиционирования, а также обеспечивать высокую устойчивость к внешним шумам и реверберациям помещения. Разработаны и протестированы прототипы системы.

Ключевые слова: навигационные системы, локальное позиционирование, псевдощумовые последовательности сигналов, координаты, точность, звуковые волны, излучатель звука, микрофон.

В последние годы активно повышаются темпы изготовления продукции различного назначения на отечественных предприятиях. Задача ускорения производственных процессов и улучшения качества выпускаемых изделий хорошо изучена и решается с помощью процессов автоматизации. Относительно новой вехой развития данных процессов стали технологии роботизации, заменяющие ручной труд автономными интеллектуальными системами.

Ключевую роль играют мобильные роботы, выполняющие операции транспортировки, погрузки и сортировки – это позволяет ускорить процессы и при этом снизить издержки. Однако одна из важнейших проблем, которую необходимо решать в процессе разработки робототехнических систем – необходимость максимально высокой точности позиционирования. Радиоэлектронные методы навигации, часто используемые в системах решения подобных задач и обеспечивающие необходимую точность, имеют высокую стоимость. Иные распространенные виды систем навигации необходимой точности достичь не позволяют.

Предлагаемая система позиционирования использует акустические методы измерения расстояний и позволяет достичь оптимального соотношения цены к точности определения координат.

Математическая задача заключается в определении положения объекта с неизвестными координатами относительно множества стационарно расставленных маяков с априорно известными координатами по трилатерационному методу [3] через измерение разницы времени прибытия сигналов от маяков до объекта (рис. 1, а).

Концепция реализации системы представлена на рис. 1, б. Модули-передатчики, оснащенные излучателями звука, а также вычислительным блоком, обеспечивающим воспроизведение уникального для каждого модуля сигнала синхронно с другими передатчиками, расставляются исходя из потребности в их прямой видимости приемником акустических сигналов (см. рис. 1, в) из максимального возможного множества месторасположений позиционируемого объекта. Приемник, смонтированный на подвижные роботизированные устройства,

способен прослушивать акустический эфир при помощи высокочувствительного микрофона (частотный диапазон 30 Гц – 20 кГц). При запросе от робота на определение собственных координат модуль-приемник начинает запись эфира, а модуль-концентратор, связанный с передатчиками 3-проводным соединением по топологии «звезда», управляет работой системы и синхронизирует созвездие передатчиков путем смены уровня напряжения на логическом проводнике. Передатчики подключены к линии синхронизации через триггеры Шмитта, воспроизведение сигнала реализовано с помощью внешнего аппаратного прерывания.

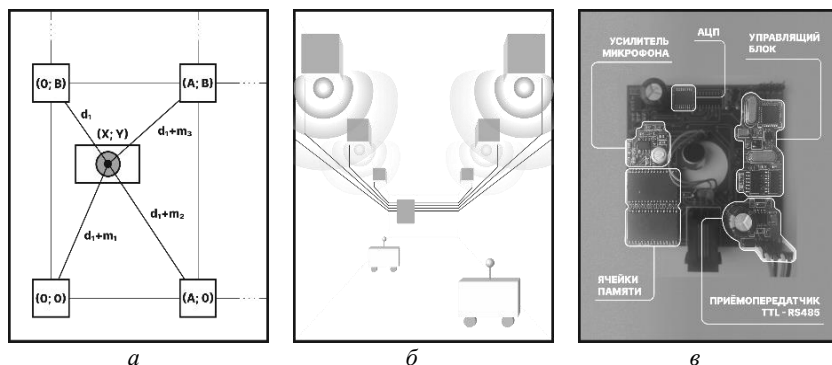


Рис. 1. Система акустического позиционирования

Особое внимание уделяется работе с акустическими сигналами. Используется часть спектра с частотами до 22 кГц с целью обеспечения универсальности используемого оборудования и его дешевизны, в частности – микрофонов и излучателей. При учете данных требований возникает проблема слышимости системы находящимися вблизи работников. Поэтому импульсные и ЛЧМ-сигналы [1] не применимы. Используются псевдошумовые последовательности (далее – ПШП) с равномерным распределением мощности сигнала по широкой полосе частот (рис. 2), чем обеспечивается низкая заметность для человеческого слухового аппарата. Формируются на основе полиномов 12-й степени, генерируемых с помощью алгоритма перебора всех их комбинаций и отбора тех, которые порождают ПШП с наименьшим уровнем боковых лепестков. Получаемые ПШП из 4096 отсчетов записываются во Flash-память микроконтроллеров и воспроизводятся в течение 0,287 с. Выбор таких сигналов значительно увеличивает помехоустойчивость работы системы [2] при высоком уровне шумов и ре-

вербераций. Временные задержки определяются корреляцией записи эфира с эталонами сигналов каждого из излучателей.

По итогам тестовых замеров координат на прототипе системы достигнута точность позиционирования в 1 мм и менее. Планируется улучшение помехоустойчивости системы и стабильности работы, разработка системы радиосинхронизации созвездия излучателей. В процессе тестирования находится связка акустической системы позиционирования с инерциальной навигационной, позволяющая взаимоисключить ключевые недостатки обоих.

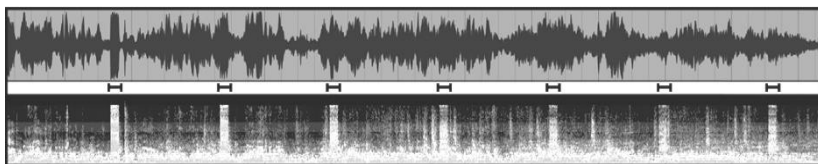


Рис. 2. Сигнал и его спектрограмма

ЛИТЕРАТУРА

1. Скляр Б. Цифровая связь: теоретические основы и практическое применение / пер. с англ. Е.Е. Грозы и др. – М.: Вильямс, 2007. – 2-е изд., испр. – 1099 с.
2. Zigangirov K. Theory of Code Division Multiple Access Communication. – IEEE Press, 2004. – 399 p.
3. Filonenko V. Asynchronous Ultrasonic Trilateration for Indoor Positioning of Mobile Phones, Doctoral thesis. – Dublin: Technological University Dublin, 2012.

УДК 004.896

РАЗРАБОТКА РОБОТА-АНИМАТОРА НА ПЛАТФОРМЕ ROBOTIS ENGINEER

А.К. Городилов, студент

Научный руководитель Е.С. Шандаров, ст. преп.

Проект ГПО ЭП-0703. Видео по запросу

г. Томск, ТУСУР, simonpacket@yandex.ru

Описывается концепция робота-аниматора для обеспечения образовательной функции для детей дошкольного и младшего школьного возраста. Приведен внешний вид, описаны принцип работы и написания движений, представлены результаты испытаний.

Ключевые слова: робототехника, сенсоры, датчики, социальная робототехника.

Социальная робототехника – новая сфера науки и технологий, которая посвящена разработке роботов, вступающих в социальные взаимодействия с людьми [1]. Особый интерес представляют роботы, обеспечивающие образовательную функцию для детей дошкольного и младшего школьного возраста [2]. Разработка социальных роботов для новых сфер применения может оказаться интересной как с точки зрения исследовательской, так и с точки зрения бизнеса.

Для привлечения внимания к выставочным стендам предлагается, в частности, применять средства робототехники [3]. В данной работе рассматривается задача создания компактного робота-аниматора, предназначенного для «оживления» выставочных стендов.

Одним из направлений деятельности лаборатории робототехники и ИИ ТУСУР является вовлечение детей школьного возраста в робототехнику для развития их навыков инженерии и программирования. Одним из форматов реализации такой деятельности является участие в выставках, проведение экскурсий для школьников. Чтобы заинтересовать ребят, мы разработали концепцию робота-аниматора.

Робот-аниматор – это антропоморфный робот, способный выполнять в течение длительного времени набор согласованных движений. Важными параметрами разработанной концепции стали: высокая надежность компонентов, относительно невысокая цена итогового изделия, компактность, возможность расширения функциональности платформы за счет ее интеграции с полноценным вычислительным модулем, например смартфоном на базе Android.

В качестве базовой платформы мы использовали комплект Robotis Engineer Kit 1. На рис. 1 показан внешний вид робота-аниматора. Набор включает в себя 12 сервоприводов 2XL430-W250-T и основан на контроллере CM-550. Контроллер поддерживает подключение по последовательному порту и интерфейсу Bluetooth. Язык программирования TASK. На роботе также есть держатель для смартфона, на котором можно вывести изображение.

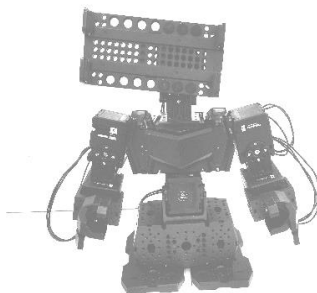


Рис. 1. Внешний вид робота-аниматора

Создание движений производится в программе R+Task 3.0. Движение состоит как минимум из двух кадров, в каждом из них задаётся положение сервоприводов. Меняя время между этими двумя кадрами, вы меняете скорость смещения робота из одной позиции в другую. Сделав несколько простых движений, вы можете объединить их в одно составное.

Во время создания анимаций мы столкнулись с проблемой «зацепления». Зацепление – ошибка во время выполнения анимации, когда робот может задеть провода, корпус или иные приводы. Последствиями зацепления могут быть повреждения на корпусе, перелом проводов и выход из строя сервоприводов. Для решения этой проблемы нужно избегать поворота сервопривода на 360 градусов, до загрузки анимаций проверять их на виртуальной модели в программе R+ Task, там же можно и подкорректировать положения сервоприводов в тех кадрах, где зацепление происходит.

Было создано 5 анимаций: «приветствие», «поклон», «воздушный поцелуй», «неправильно» и «молодец». В таблице приведены время выполнения и количество используемых сервоприводов в анимации. Чтобы переход между анимациями был плавным, каждая начинается и заканчивается базовым положением робота. Закончив создание движений, мы объединили их все в одно составное и заиклили его. Поскольку на роботе есть держатель для смартфона, мы также создали для него анимированное лицо.

Время выполнения и количество используемых сервоприводов

Анимация	Приветствие	Поклон	Воздушный поцелуй	Неправильно	Молодец
Время выполнения, с	7	4	6	5	7
Кол-во сервоприводов	4	4	6	6	9

Испытания. Тестирование разработки производилось в лаборатории развития искусственного интеллекта студенческого бизнес-инкубатора «Дружба». Во время испытаний были подрегулированы движения так, чтобы робот не задевал себя.

Робот-аниматор участвовал в таких мероприятиях, как «Наука 0+» в ТПУ, «Наука.Мост» в Кванториуме, «Форум робототехники» в Красноярске. Также мы регулярно проводим экскурсии групп детей и школьников в лабораторию робототехники. Робот показал себя с хорошей стороны: не испытывал трудностей в движениях и не перегревался в течение нескольких часов. Особенностью робота стала про-

стота создания движения: дети смогли сами придумать и сделать небольшие движения для робота. Недостатком стало то, что робот порой отвлекал на себя внимание в те моменты, когда нас должны слушать, на это время аниматора лучше всего останавливать.

Заключение. В результате выполнения данной работы была сформирована концепция, произведены разработка и испытания платформы робота-аниматора. Разработка успешно прошла испытания в реальных условиях. Принято решение развития платформы в части интеграции ее с полноценным вычислительным модулем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антропоморфный робот-помощник воспитателя дошкольного учреждения / А.Н. Зимина, Д.И. Ример, Е.В. Соколова и др. // Электронные средства и системы управления: матер. докладов междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. – Томск: В-Спектр, 2015. – Т. 2. – С. 108–113.

2. Polyntsev E. «MEOW» – A Social Robot Platform for School / E. Polyntsev, V. Zhelonkin, E. Shandarov // Lecture Notes in Computer Science. – 2021. – Vol. 12998 LNAI. – P. 162–171. DOI: 10.1007/978-3-030-87725-5_14.

3. Каркашова Н.С. Новые технологии в организационно-выставочной деятельности на b2b рынке в России / Н.С. Каркашова, М.В. Нохрина, В.В. Фокина // Матер. конф. «Технологии PR и рекламы в современном обществе», Санкт-Петербург, 20 марта 2018 г. – СПб.: «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018. – Т. 1. – С. 108–115.

УДК 004.896

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАМЕРЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ TRACKINGCAM ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЛИГИ «РОБОТЫ-СПАСАТЕЛИ» ЛИНИИ ЧЕМПИОНАТА ROBOCUP

М.М. Кадышев, студент

Научный руководитель Е.С. Шандаров, ст. преп.

Проект ГПО ЭП-0703. Видео по запросу

г. Томск, TUCUP, salazar332@bk.ru

Рассматривается задача обнаружения и классификации цветовых областей на поле в соревнованиях лиги роботов-спасателей чемпионата по робототехнике РобоКап. Использован модуль технического зрения TrackingCam, произведена его настройка на типовые объекты полосы препятствий. Разработано программное обеспечение управляющей программы робота.

Ключевые слова: робототехника, камера, техническое зрение, РобоКап, RoboCup.

Международный чемпионат по робототехнике RoboCup включает в своей программе соревнования роботов-спасателей на линии команд

юниоров (школьники и студенты младших курсов) RCJ Rescue Line [1]. Перед участниками лиги поставлена задача создать автономного робота, который будет следовать по черной линии, преодолевая препятствия на модульном поле, образованном из плиток с разным рисунком. Покрытие поля белого цвета, а плитки находятся на разных уровнях, соединенных пандусами. Не разрешается заранее сообщать своему роботу какую-либо информацию о поле, поскольку предполагается, что робот сам распознает эту область.

Для решения задач в лиге «Роботы-спасатели» линии (RCJ Rescue Line) робот должен уметь распознавать различные цветовые метки на поле. Так, например, для успешного выбора дальнейшего направления движения на перекрестке, робот должен найти зеленую метку (размером 25×25 мм) и определить ее местоположение относительно линий перекрестка.

Для решения задачи движения по черной линии целесообразно использовать датчики света, но для эффективного определения цветowych меток необходим иной инструмент. В качестве такого инструмента нами было принято решение использовать камеру технического зрения TrackingCam, (ООО «Прикладная робототехника»). Характеристики камеры: разрешение 640×480 пикселей, кадровая частота до 30 fps, углы обзора камеры от 45 до 75 градусов по горизонтали и до 47 градусов по вертикали, глубина цвета 8 бит.

В качестве бортового компьютера мы использовали плату Arduino Mega. Схема подключения камеры к контроллеру Arduino выглядит так, как показано на рис. 1.

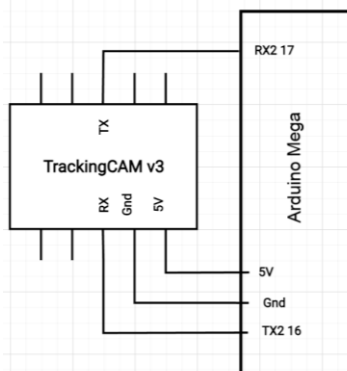


Рис. 1. Схема подключения камеры к Arduino

Модуль камеры подключается через интерфейс UART, обмен данными происходит с помощью протокола Dynamixel.

Поскольку камера TrackingCam имеет на борту собственный вычислительный модуль, мы настроили ее на обнаружение в кадре следующих типов объектов: линия «финиш» красного цвета и цветная квадратная метка на перекрестке зеленого цвета. При опросе камеры она возвращает следующий набор данных: количество найденных камерой областей; номер области; координаты центра распознанной области; размеры распознанной области.

Распознавание перекрёстка и указателя правильного поворота на нём. При выполнении задачи лиги, связанной с поворотом на перекрёстке в зависимости от положения меток, необходимо определить положение меток, для этого выполняется следующий алгоритм (рис. 2)

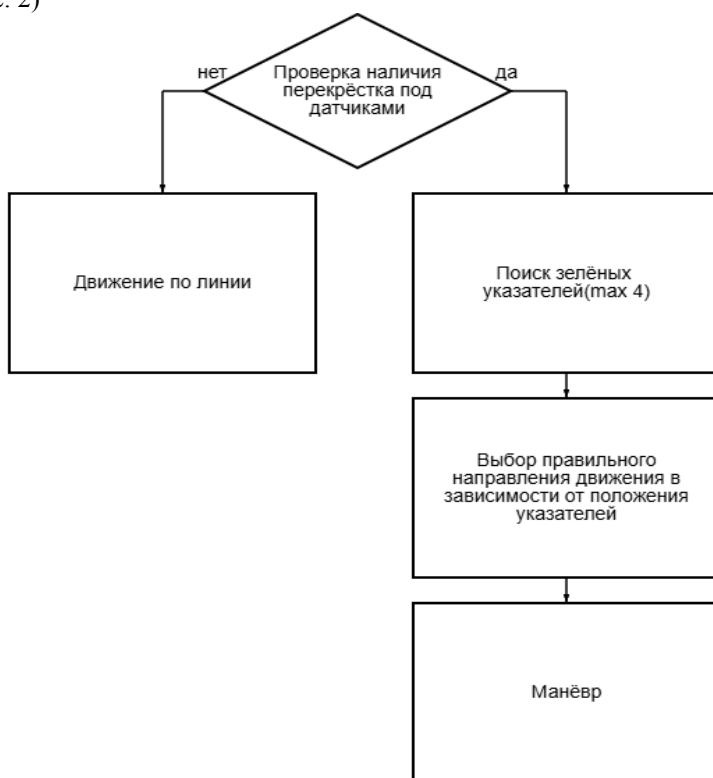


Рис. 2. Блок-схема поворотов на перекрёстках

При определении указателя поворота важной задачей является определение положения метки относительно горизонтальной линии перекрёстка, так как в случае если метка находится за линией, то мы

должны проехать перекрёсток в прямом направлении. Для решения данной задачи был разработан следующий алгоритм:

- Шаг 1: Определение перекрёстка.
- Шаг 2: Отъезд назад, пока камера не увидит метки.
- Шаг 3: Считывание с камеры информации о количестве меток.
- Шаг 4: Максимальное приближение к перекрёстку.
- Шаг 5: Считывание с камеры информации о количестве меток и сравнение их количества с предыдущим результатом считывания.
- Шаг 6: Проезд прямо или поворот по указателю в зависимости от результата сравнения количества меток.

Определение финишной плитки. Согласно правилам лиги, робот по достижении финишной плитки должен остановиться на ней в течение 5 с. Так как необходимо остановиться непосредственно перед линией, есть необходимость выполнять команду остановки только в том случае, когда красная линия достаточно близко, для этого реализована следующий программный блок (рис. 3).

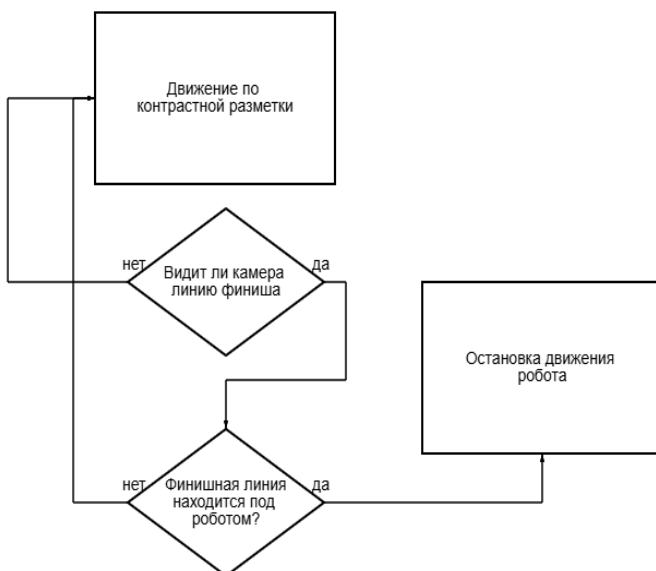


Рис. 3. Блок-схема определения линии финиша

Программный фильтр шумов. Вид шумов можно определить как фантомные зелёные области на поле, вызванные тем, что свет, падающий на поле, имеет в своём спектре компоненты зелёного цвета. Так как мы заранее знаем площадь зелёного указателя, то был реали-

зован программный фильтр. Принцип работы фильтра заключается в том, что он анализирует значение площади метки и в зависимости от этого определяет эту метку как фантомную зелёную область или указатель движения на перекрёстке.

Заключение. Разработанные алгоритмы использовались на чемпионате «Робокап Россия 2024», Томск, и RoboCup Asia-Pacific, 2024, Циндао, Китай, командой Photon в их роботе-спасателе. На RoboCup Asia-Pacific команда Photon заняла II место в лиге.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ронжин А.Л. Международные соревнования роботов по футболу RoboCup и перспективы участия в них российских команд / А.Л. Ронжин, Л.А. Станкевич, Е.С. Шандаров // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2 (7). – С. 24–29.

УДК 629.3.054.4

ОБЗОР ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ СОВРЕМЕННЫХ ЛИДАРНЫХ СИСТЕМ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ АВТОМОБИЛЕМ

А.О. Кудрявцев, с.н.с. НИЦ;

В.А. Фукалов, оператор роты (научной)

Научный руководитель М.С. Парфенов, адъюнкт науч.-исслед. центра Военной орденов Жукова и Ленина Краснознаменной академии связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного МО РФ

г. Санкт-Петербург, work.originals@gmail.com,

vladfukalov@yandex.ru

Представлены обзор различных технологий, применяемых при разработке современных лидарных систем, их различие, преимущества и недостатки. Также рассматриваются лидары, представленные компаниями-производителями, их технические особенности и области применения. Приводятся примеры компаний, использующих технологию LiDAR в системах автоматизированного управления транспортными средствами, а также системах управления дорожной обстановкой.

Ключевые слова: лидарные системы, автоматизированное управление, транспортные средства.

В настоящее время наиболее распространенным прибором для сканирования местности и ориентации автономных устройств в пространстве является LiDAR.

LiDAR – это технология, основанная на измерении расстояния до объекта посредством отправки лазерного луча и определения времени, затраченного на его возвращение в приёмник.

Факторы, определяющие технологию изготовления. Управление лучом:

Вращающийся лидар – оснащён массивом вертикально ориентированных лазеров, вращающихся на 360° с высокой скоростью. Этот метод обеспечивает полное покрытие пространства, но отличается значительной стоимостью.

Механический сканирующий лидар – использует излучатель и систему зеркал для перенаправления луча. Часто применяются MEMS-зеркала, совершающие высокочастотные колебания для точного сканирования.

Активная фазированная антенная решётка (АФАР) – направление луча корректируется за счёт фазового сдвига между соседними передатчиками, обеспечивая динамическую настройку без механических элементов.

Способы измерения расстояния. ToF (Time of Flight) – технология, основанная на отправке короткого импульса и измерении времени его возврата, позволяющая определить расстояние до объекта.

НИЧМ (непрерывное излучение с частотной модуляцией) – использует двойной луч, один из которых направляется к объекту, а второй служит опорным. Разница их частот позволяет вычислять не только расстояние, но и скорость движения объекта. Ключевое преимущество – устойчивость к интерференции, вызванной отражениями от других лидаров или солнечного света. Кроме того, метод даёт возможность измерять скорость благодаря эффекту Доплера [1].

НИАМ (непрерывное излучение с амплитудной модуляцией) – основан на измерении времени, за которое отправленный сигнал проходит к объекту и обратно. Использует сложную схему модуляции с псевдослучайными последовательностями нулей и единиц, что повышает точность.

Длина волны излучения: 850 и 905 нм – доступные и экономичные излучатели, однако при высокой мощности представляют опасность для сетчатки глаза.

1550 нм – безопасны для зрения и обеспечивают большую дальность работы, но требуют использования дорогостоящих материалов (например, арсенида галлия-индия) и потребляют больше энергии. При значительной мощности могут нанести вред оптическим приборам.

Производители лидаров и их применение. На рынке лидаров доминируют компании Velodyne, Luminar, AEye, Ouster и RoboSense, предлагая передовые технологии для различных сфер.

Компания Velodyne выпускает модели Alpha Prime, Ultra Puck и Velarray H800. Первые два представляют собой вращающиеся лидары, обладающие высокой дальностью действия, широким углом обзора и детализированной картографией окружающего пространства. Они востребованы в робототехнике, картографии и системах безопасности.

Модель Velarray H800 предназначена для оснащения автомобилей системами помощи водителю (ADAS). Его ключевые преимущества – компактные габариты, позволяющие установку за лобовым стеклом, и доступная цена (не превышает 500 долл.), что делает технологию более массовой.

Компания Luminar выпускает лидары Iris и Halo. Модель Halo выделяется высотой всего 25 мм, длиной волны 1550 нм и массой 1 кг [2]. Эти характеристики позволяют интегрировать её в автомобили Volvo EX90, предназначенные для широкой аудитории.

Лидар Halo, работая в тандеме с камерами, радаром и другими сенсорами, становится неотъемлемой частью автопилотируемых систем, которые снижают вероятность ДТП и способствуют сокращению пробок.

Лидары компании Ouster оснащены вращающейся системой сканирования, работают на основе технологии ToF (Time of Flight) и могут содержать 32, 64 или 128 лазеров [3].

Флагманская модель OS2 с 128 лазерами сочетает малую массу, низкое энергопотребление и дальность сканирования до 120 м при вертикальном поле зрения 45°.

LiDAR в автономных системах. Технология LiDAR широко применяется не только в автомобилях Volvo, но и в системах автономного вождения от Uber, Tesla и Waymo [4]. Эти компании используют лидары для обеспечения безопасного движения, повышения точности навигации и улучшения восприятия окружающей среды в беспилотных транспортных средствах.

Заключение. Таким образом, развивающаяся технология LiDAR играет важную роль в разработке современных систем автономного вождения, а также проектах умных городов, позволяя создавать точные 3D-карты местности, распознавать различные объекты и препятствия на дороге, даже в сложных погодных условиях повышая безопасность дорожного движения. Однако данная технология имеет недостаток в виде создания ложных отражений в условиях плотной городской застройки или в движении. Несмотря на это в сочетании с камерами и радаром она позволяет заметно увеличить производительность систем автономного управления транспортными средствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Легкоступ В.В. Методика определения статистических характеристик оценки дальности по доплеровским смещениям частоты // Системный анализ и прикладная информатика. – 2022. – С. 20–26.
2. Luminar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.luminartech.com/technology#iris>, свободный (дата обращения: 25.02.2025).
3. Ouster [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ouster.com/products/hardware/os2-lidar-sensor>, свободный (дата обращения: 25.02.2025).
4. Шибаев В.М. Технология LiDAR в автономных транспортных средствах / В.М. Шибаев, М.А. Зуев, К.С. Баланев // Информатика. Экономика. Управление – Informatics. Economics. Management. – 2024. – Т. 3, вып. 2. – С. 0219–0225.

УДК 004.896

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАМЕРЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ TRACKINGCAM ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СОРЕВНОВАНИЙ ПО ФУТБОЛУ ЧЕЛОВЕКОПОДОБНЫХ РОБОТОВ

Ю.Н. Михайлова, студентка

Научный руководитель Е.С. Шандаров, ст. преп.

Проект ГПО ЭП-0703. Видео по запросу

г. Томск, ТУСУР, saltedcucumberswithdill@gmail.com

Рассматривается решение задачи разработки системы «зрения» для человекоподобного робота-футболиста. Предложено использовать модуль технического зрения TrackingCam, произведена настройка модуля для обнаружения объектов игры. Разработан алгоритм управляющей программы робота.

Ключевые слова: техническое зрение, камера, футбол роботов, РобоКап, RoboCup.

Международный чемпионат по робототехнике RoboCup включает в себя множество различных дисциплин, одной из которых является футбол человекоподобных роботов [1]. С 2018 г. коллектив лаборатории робототехники и ИИ ТУСУР разработал и развивает формат соревнований по футболу человекоподобных роботов для команд юниоров (школьники и студенты младших курсов) [2].

Основная задача участников соревнований – обнаружение, классификация и отслеживание объектов на поле. Для выполнения данной задачи могут использоваться модули технического зрения – сенсорные устройства для обработки и анализа окружающего пространства посредством данных, воспринимаемых с встроенной видеокамеры.

Для футбола автономных гуманоидных роботов выбрана платформа Robotis Bioloid Premium. Причина данного выбора – соответствие регламенту чемпионата RoboCup, относительная легкость сборки, возможность последующих корректировок и наличие собственного ПО. В дисциплине участники не имеют права управлять роботом, поэтому стоит задача создать условия для андроида, которые сделают его способным самостоятельно отслеживать мяч на поле.

Для обеспечения робота «зрением» целесообразно использовать модуль технического зрения TrackingCam. Выбор этого устройства обусловлен подходящими техническими характеристиками: разрешение камеры 640×480 пикселей, кадровая частота до 30 fps, углы обзора камеры от 45 до 75° по горизонтали и до 47° по вертикали, глубина цвета 8 бит. Данный модуль способен выполнять операции по распознаванию как одноцветных объектов, так и составных объектов, состоящих из нескольких цветовых областей. Кроме того, можно определять морфологические признаки, например площадь, что помогает точно распознавать мяч на поле.

Чтобы настроить камеру на мяч оранжевого цвета, была использована программа TrackingCamApp. Программа состоит из 6 окон с определенным функционалом. Основной интерес представляет окно Tracking Cam, где можно работать с ползунками, позволяющими задать и зафиксировать спектр характеристик. Подключение модуля к ПК происходит через кабель USB.

Существует два способа настройки камеры: грубая настройка, подразумевающая определение цветового пятна неточно, и точная настройка, предоставляющая доступ к цвету, его глубине, яркости и концентрации необходимого цвета, а также допустимой площади. Точная настройка помогает избежать мелких шумов и помех. Для настройки поиска пятен по их форме могут быть использованы следующие ползунки: Area – площадь пятна в пикселях, Circularity – округлость, Inertia – вытянутость, Convexity – выпуклость. Помимо этого, существуют ползунки Size, Space и Gaps, которые помогают ограничить площадь фигуры. На рис. 1 наглядно показаны настройки камеры, где видно, что модуль точно различает оранжевые мячи, а также разделяет их на два самостоятельных объекта.

Перед разработчиком стоит задача связывания камеры и Dynamixel. Этого можно добиться, нажав на кнопку Setup IO и выбрав нужный пункт. Синхронизация настроек камеры происходит через кнопку Sync.

Для установки модуля TrackingCam на робота к 18 основным сервоприводам необходимо добавить еще два, обеспечивающих поворо-

ты камеры по горизонтали и вертикали. Изображение с камеры должно передаваться на процессор: между TrackingCam и CM-530 должна происходить интеграция. Контроллер используется для управления сервоприводами с протоколом Dynamixel, позволяя передавать информацию о найденных объектах с камеры на CM-530.

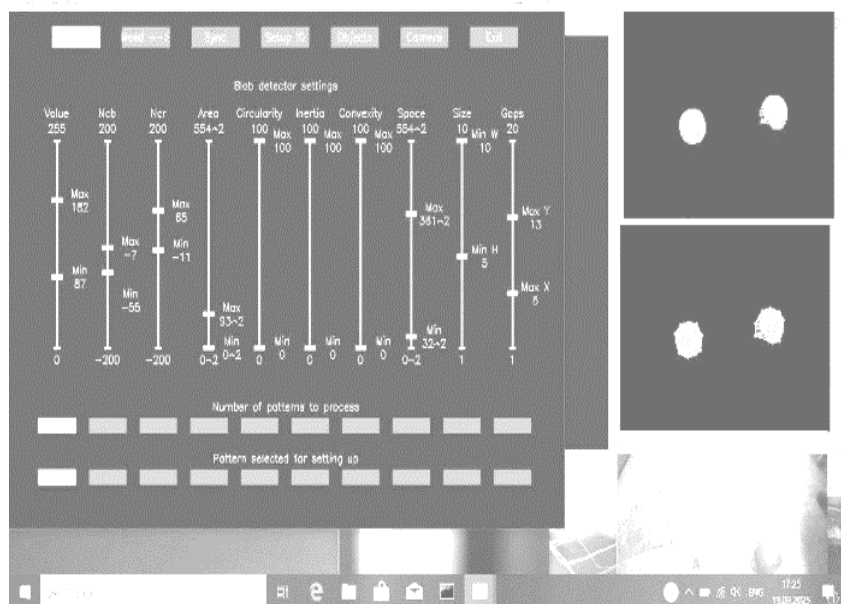


Рис. 1. Настройки камеры на оранжевый мяч

Для управления роботом разработан алгоритм, представляющий бесконечный цикл с проверкой условий и, при их достижении, реализацией пакета функций. Структурная блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

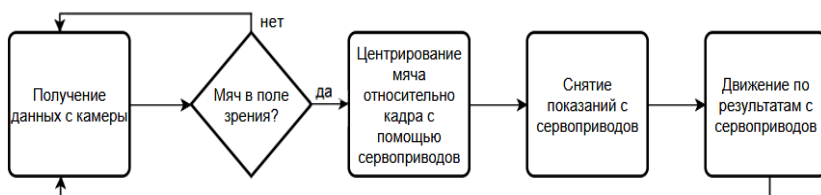


Рис. 2. Структурная блок-схема алгоритма управляющей программы

Заключение. В результате выполненной работы были произведены настройки модуля технического зрения для обнаружения объектов

та типа «оранжевый мяч», произведена интеграция модуля в конструкцию человекоподобного робота, обеспечена связь с контроллером СМ-530, разработан алгоритм управления. Развитием работы станет разработка программного обеспечения автономного робота-футболиста, расширение списка объектов для обнаружения (ворота, разметка поля, соперники).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ронжин А.Л. Международные соревнования роботов по футболу RoboCup и перспективы участия в них российских команд / А.Л. Ронжин, Л.А. Станкевич, Е.С. Шандаров // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2 (7). – С. 24–29.
2. Соревнования по футболу человекоподобных роботов для команд юниоров Junior Humanoid Soccer Entry / А.Д. Алябьева, С.В. Косаченко, А.В. Макаров, Е.С. Шандаров // Электронные средства и системы управления: матер. докл. междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. – 2023. – Т. 1. – С. 295–297.

УДК 004.932.2

СПЕЦИФИКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ КАМЕРЫ PIXU ПО СРАВНЕНИЮ С ДРУГИМИ КАМЕРАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

С.О. Винокурова, Д.А. Осипенко, студентки каф. КСУП;

А.А. Изюмов, ст. преп. каф. КСУП;

Ю.А. Шурыгин, проф. каф. КСУП, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, anton.izyumov@gmail.com

Проводится анализ камеры Pixu в сравнении с альтернативными решениями, используемыми в системах компьютерного зрения. Рассматриваются её основные преимущества. Для более детального анализа представлено сравнение с Raspberry Pi Camera и Intel RealSense. Работа направлена на определение областей применения Pixu в зависимости от требований к системе компьютерного зрения и обозначение специфики ее программирования.

Ключевые слова: компьютерное зрение, камера Pixu, распознавание объектов, Raspberry Pi Camera, Intel RealSense, анализ, сравнение.

Современные системы компьютерного зрения активно используют специализированные камеры, которые отличаются по своим характеристикам, стоимости и возможностям обработки данных. Выбор камеры во многом зависит от требований к скорости, точности и сложности распознавания объектов. Одним из популярных решений для простых проектов является Pixu-камера, способная самостоятельно обрабатывать изображения и передавать данные о распознанных

объектах. В данной статье рассматриваются её преимущества и недостатки в сравнении с более продвинутыми альтернативами, такими как Raspberry Pi Camera и Intel RealSense.

Преимущества камеры PiXu:

1. Простота использования – PiXu разработана специально для проектов в области робототехники и автоматизации. Встроенный процессор обрабатывает изображения в реальном времени и передаёт информацию об объектах, что существенно упрощает интеграцию в системы управления.

2. Высокая скорость обработки – камера способна анализировать изображения со скоростью до 50 кадров в секунду, что делает её пригодной для динамических приложений.

3. Поддержка различных интерфейсов – PiXu оснащена интерфейсами I2C, SPI и UART, что позволяет подключать её к широкому спектру микроконтроллеров и встраиваемых систем, включая Arduino и Raspberry Pi.

4. Относительно низкая стоимость – хотя PiXu не является самой дешёвой камерой, её цена ниже, чем у профессиональных систем компьютерного зрения, что делает её доступной для образовательных и любительских проектов.

5. Обучение на основе цветовых характеристик – камера способна запоминать и распознавать объекты на основе их цветовой сигнатуры, что избавляет пользователя от необходимости программировать сложные алгоритмы обработки изображений.

Недостатки камеры PiXu:

1. Ограниченные возможности распознавания – PiXu использует цветовую сегментацию, что делает её неэффективной в условиях сложного освещения или при работе с объектами схожего цвета.

2. Низкое разрешение – разрешение PiXu составляет 640×400 пикселей, что значительно уступает современным камерам и ограничивает её использование в задачах, требующих высокой детализации.

3. Отсутствие сложных алгоритмов обработки изображений – в отличие от Raspberry Pi Camera или Intel RealSense, PiXu не поддерживает алгоритмы машинного обучения, глубокого анализа изображений или 3D-визуализации.

4. Зависимость от освещения – изменения освещения могут существенно повлиять на точность распознавания, что ограничивает надёжность работы камеры в реальных условиях.

5. Ограниченное количество объектов для распознавания – PiXu может отслеживать только 7 цветовых сигнатур одновременно, что может быть недостаточным для сложных приложений.

Для более полного анализа рассмотрим сравнение PiXu с двумя популярными альтернативами: Raspberry Pi Camera и Intel RealSense. Технические характеристики устройств приведены в таблице.

Сравнение характеристик камер

Характеристика	PiXu	Raspberry Pi Camera	Intel RealSense
Разрешение	640×400	До 12 МП	До 1270×720(3D)
Тип обработки	Встроенная	Зависит от ПО	Встроенная + ПО
Алгоритмы CV	Цветовая сегментация	OpenCV, TensorFlow	Глубинный анализ, AI
Скорость обработки	До 50 FPS	До FPS 90	До FPS 90
Интерфейсы	I2C, SPI, UART	CSI	USB, Ethernet
Стоимость	Около 10 970 руб.	Около 5 350 – 5 990 руб.	Высокая (точная цена зависит от модели)

Из таблицы видно, что PiXu значительно уступает Raspberry Pi Camera и Intel RealSense по разрешению и возможностям обработки изображений. Однако её главное преимущество заключается в простоте использования и высокой скорости работы без необходимости программирования сложных алгоритмов.

Камера PiXu отличается простотой программирования, что делает её популярной среди начинающих разработчиков и любителей робототехники. Основная особенность программирования PiXu заключается в использовании встроенного процессора, который самостоятельно обрабатывает изображения и передаёт уже распознанные объекты. Это значительно упрощает интеграцию камеры в проекты, так как разработчику не требуется писать сложные алгоритмы обработки изображений с нуля.

Для настройки камеры используется специализированное программное обеспечение PiXuMon, которое позволяет калибровать камеру, обучать её распознаванию объектов по цвету и настраивать параметры обработки изображений. Программирование PiXu осуществляется через интерфейсы I2C, SPI или UART, что позволяет подключать её к популярным микроконтроллерам, таким как Arduino и Raspberry Pi.

Одной из ключевых особенностей PiXu является возможность обучения камеры распознаванию объектов на основе их цвета. Это делается с помощью простого процесса, при котором пользователь подносит объект к камере и нажимает кнопку для запоминания цветовой сигнатуры. После обучения камера может автоматически распознавать объекты с заданными цветами и передавать данные о их местоположении.

Однако программирование Piхu имеет свои ограничения. Камера не поддерживает сложные алгоритмы компьютерного зрения, такие как распознавание лиц или текста, что делает её менее универсальной по сравнению с более продвинутыми решениями. Тем не менее для задач, связанных с распознаванием цветных объектов, Piхu остаётся удобным и доступным инструментом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Charmed Labs. Pixy Camera – Overview and Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.pixycam.com> (дата обращения: 25.02.2025).
2. Raspberry Pi Foundation. Module Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.raspberrypi.org/documentation/> (дата обращения: 25.02.2025).
3. Intel RealSense Technology. Intel RealSense Cameras and Applications. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.intelrealsense.com> (дата обращения: 25.02.2025).

УДК 681.3

ИНТЕГРАЦИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ ARDUINO

*Е.С. Попадайкин, Н.А. Килин, С.В. Михнюк, студенты каф. КСУП;
Ю.А. Шурыгин, проф. каф. КСУП, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР*

Рассматривается интеграция с микроконтроллерами Arduino, включая аспекты программирования, подключения периферийных устройств и применение в различных проектах.

Ключевые слова: микроконтроллеры, Arduino, программирование, периферийные устройства, робототехника.

Микроконтроллеры Arduino стали популярными инструментами для разработки различных электронных устройств и систем. Их простота в использовании, доступность и широкая поддержка сообществом делают их идеальными для образовательных целей, прототипирования и даже коммерческих приложений. Платформа Arduino предоставляет пользователям возможность быстро и эффективно разрабатывать проекты, используя готовые решения и библиотеки. В данной статье рассматриваются основные аспекты интеграции с микроконтроллерами Arduino, включая программирование, подключение периферийных устройств и применение в различных проектах. Пример микроконтроллера Arduino можно рассмотреть на рис. 1.

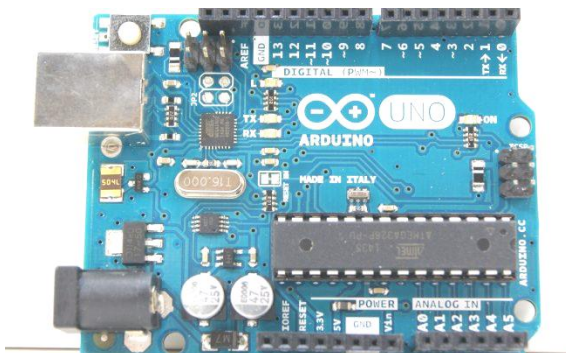


Рис. 1. Микроконтроллер Arduino Uno R3

Всего подвидов Arduino существует несколько десятков, однако самыми мощными из них являются Arduino Mega – их существует всего несколько видов. Arduino Mega 2560 – это одна из наиболее мощных плат в линейке Arduino, которая предлагает значительные вычислительные ресурсы по сравнению с другими моделями, такими как Arduino Uno. Основные характеристики Arduino Mega включают:

- Процессор: ATmega2560 с тактовой частотой 16 МГц.
- Память: 256 КБ флеш-памяти для хранения кода, 8 КБ статической оперативной памяти (SRAM) и 4 КБ памяти для хранения данных (EEPROM).
- Порты ввода-вывода: 54 цифровых пина, из которых 15 могут использоваться как ШИМ-выходы, и 16 аналоговых входов.

Программирование микроконтроллеров Arduino осуществляется с помощью языка, основанного на C/C++. Среда разработки Arduino IDE предоставляет пользователям удобный интерфейс для написания, компиляции и загрузки кода на плату. Основные компоненты программы Arduino включают функции **setup()** и **loop()**, которые отвечают за инициализацию и выполнение основного цикла программы соответственно.

Функция **setup()** выполняется один раз при запуске устройства и используется для настройки начальных параметров, таких как установка режимов работы пинов (вход или выход) и инициализация последовательного порта. Функция **loop()** выполняется бесконечно, что позволяет программе реагировать на изменения во времени и состоянии входов.

Программирование Arduino позволяет использовать различные библиотеки, которые значительно упрощают работу с периферийными устройствами, такими как датчики, моторы и дисплеи. Например,

библиотека **Wire** используется для работы с устройствами по протоколу I2C, а библиотека **Servo** позволяет управлять сервомоторами [1]. Существуют также библиотеки для работы с Wi-Fi и Bluetooth, что открывает новые горизонты для создания беспроводных приложений.

Одним из ключевых аспектов интеграции с Arduino является возможность подключения различных периферийных устройств. Arduino поддерживает множество интерфейсов, таких как цифровые и аналоговые входы/выходы, SPI, I2C и UART. Это позволяет подключать широкий спектр датчиков и исполнительных механизмов.

Например, для работы с температурным датчиком DS18B20 можно использовать библиотеку **OneWire**, которая упрощает взаимодействие с устройством. Подключение датчика осуществляется через один цифровой пин, что позволяет экономить ресурсы платы [2]. Аналогично для управления светодиодами можно использовать библиотеку **Adafruit NeoPixel**, которая позволяет управлять адресными RGB-светодиодами с помощью всего одного пина.

Кроме того, Arduino может работать с различными модулями, такими как датчики движения, ультразвуковые датчики расстояния, датчики влажности и температуры, а также модули GPS. Это делает платформу универсальным инструментом для создания различных проектов, от простых до сложных.

Интеграция с микроконтроллерами Arduino находит широкое применение в различных проектах. Одним из популярных направлений является создание умного дома, где Arduino используется для управления освещением, отоплением и системами безопасности. Например, с помощью Arduino можно создать систему автоматического управления освещением, которая будет включать и выключать свет в зависимости от наличия людей в комнате [3]. Такие системы могут быть дополнены датчиками движения и освещенности, что позволяет оптимизировать потребление электроэнергии.

Микроконтроллеры Arduino обладают широкой совместимостью с различными устройствами, что делает их универсальными для множества проектов. Они поддерживают интеграцию с цифровыми и аналоговыми датчиками, исполнительными механизмами, дисплеями и модулями связи, такими как Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee и GSM. Благодаря интерфейсам UART, SPI и I2C можно легко подключать внешние микросхемы, контроллеры и периферийные устройства. Arduino также может взаимодействовать с ПК, мобильными устройствами и облачными сервисами, позволяя создавать IoT-системы, системы автоматизации и робототехнические комплексы [4]. Например, с помощью модуля HC-05 можно создать Bluetooth-управляемый робот, который будет реагировать на команды с мобильного устройства.

Также стоит отметить, что Arduino активно используется в образовательных учреждениях для обучения студентов основам программирования и электроники. Студенты могут создавать свои собственные проекты, что способствует развитию их творческих и технических навыков. В рамках учебных курсов часто проводятся соревнования по робототехнике, где команды студентов разрабатывают и программируют роботов на базе Arduino.

Интеграция с микроконтроллерами Arduino открывает широкие возможности для разработчиков и исследователей. Простота программирования, возможность подключения различных периферийных устройств и разнообразие применений делают Arduino идеальным инструментом для реализации инновационных проектов. Платформа позволяет быстро прототипировать идеи и тестировать их в реальных условиях, что особенно важно в условиях быстро меняющегося технологического мира.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бенедиктов А.Ю. Основы программирования Arduino: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ, 2018. – 120 с.
2. Кузнецов И.В. Практика работы с датчиками на Arduino // Электроника и связь. – 2020. – № 3. – С. 45–50.
3. Сидоров П.А. Умный дом на базе Arduino: проектирование и реализация. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2019. – 150 с.
4. Петрова Н.С. Робототехника на Arduino: от идеи до реализации // Научные труды конференции по робототехнике. – Екатеринбург, 2021. – С. 78–82.
5. Arduino Mega 2560: Полное руководство // Официальный сайт Arduino [Электронный ресурс]. – С. 1–10.
6. Оценка производительности Arduino Mega для IoT-приложений // Научные статьи и исследования. – С. 15–20.

УДК 621.396

РАДИОУПРАВЛЯЕМЫЙ РОБОТ С МАНИПУЛЯТОРОМ НА БАЗЕ ARDUINO MEGA 2560

***Д.А. Сопяженец, Д.Г. Петракевич, М.Е. Шведов, студенты;
А.А. Изюмов, ст. преп. каф. КСУП***

*Научный руководитель В.П. Коцубинский, доцент каф. КСУП, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, anton.izyumov@gmail.com,
kvp@kcup.tusur.ru*

Представлена разработка радиоуправляемого робота с манипулятором на базе платформы Arduino MEGA 2560, подробно описаны этапы программирования и интеграции различных модулей, таких

как управление движением, работа с манипулятором и настройка беспроводной связи. Также представлено мобильное приложение, позволяющее управлять движением робота, манипулятором и захватом предметов.

Ключевые слова: роботы, манипуляторы, мобильное приложение, омни-колёса.

Подвижные роботы с манипуляторами – это роботы, способные передвигаться в пространстве и выполнять сложные операции с объектами при помощи механических «рук». Они управляются как в ручном режиме, посредством радиоволн, так и в автоматическом режиме посредством сложных алгоритмов.

Описание платформы. Имеющаяся платформа представляет собой робота на 6 колесах, которые подключены к одной плате на основе: отладочной платы Arduino MEGA 2560 на базе микроконтроллера ATmega2560; микросхемы драйвера моторов L298N; 4 сервопривода для управления манипулятором, подключенных к модулю на базе 12-битного ШИМ-контроллера PCA9685; Bluetooth-модуль HC-05; преобразователь напряжения до 12 В для питания двигателей и до 5 В для питания остальной электроники.

Для реализации работы с роботом необходимо было реализовать каждую отдельную часть, а затем объединить их работу в программном коде.

Работа с движением. Драйвер двигателей L298N способен управлять нагрузкой двух каналов [1]. В роли каналов выступают двигатели, подключенные параллельно слева и справа робота. Управление происходит по следующей логике: разнозначные сигналы на IN1 и IN2 включают двигатели на первом канале вперед или назад в зависимости от пары «1–0» и «0–1». Аналогичная логика для управления вторым каналом. ENA и ENB назначают мощность первого и второго канала, т.е., скорость вращения двигателей, соответственно посредством ШИМ. Микроконтроллер способен аппаратно выдавать ШИМ-сигнал.

Работа с манипулятором. Микросхема PCA9685 управляется посредством интерфейса I2C [2]. Команды и регистры описаны в документации данной микросхемы, представленной на рис. 1.

Однако перед управлением сервоприводами требуется узнать о диапазоне времён управляющего сигнала для каждого двигателя для их адекватного поворота. Были подобраны тайминги для каждого из сервоприводов.

Работа с беспроводной частью. В роли радиоприёмопередатчика выступает Bluetooth-модель HC-05. Протокол Bluetooth широко

распространён в бытовых устройствах, что позволит управлять роботом через смартфон. Модуль работает по интерфейсу UART [3]. Однако он работает по 3,3-вольтовой логике, поэтому его контакт RX был подключен к микроконтроллеру через резистивный делитель напряжения. Модуль передаёт данные со скоростью 9600 бод, что достаточно для нормального управления роботом.

Table 7. LED_ON, LED_OFF control registers (address 06h to 45h) bit description

Legend: * default value.

Address	Register	Bit	Symbol	Access	Value	Description
06h	LED0_ON_L	7:0	LED0_ON_L[7:0]	R/W	0000 0000*	LEDn_ON count for LED0, 8 LSBs
07h	LED0_ON_H	7:5	reserved	R	000*	non-writable
		4	LED0_ON_H[4]	R/W	0*	LED0 full ON
		3:0	LED0_ON_H[3:0]	R/W	0000*	LEDn_ON count for LED0, 4 MSBs
08h	LED0_OFF_L	7:0	LED0_OFF_L[7:0]	R/W	0000 0000*	LEDn_OFF count for LED0, 8 LSBs
09h	LED0_OFF_H	7:5	reserved	R	000*	non-writable
		4	LED0_OFF_H[4]	R/W	1*	LED0 full OFF
		3:0	LED0_OFF_H[3:0]	R/W	0000*	
0Ah	LED1_ON_L	7:0	LED1_ON_L[7:0]	R/W	0000 0000*	LEDn_ON count for LED1, 8 LSBs
0Bh	LED1_ON_H	7:5	reserved	R	000*	non-writable
		4	LED1_ON_H[4]	R/W	0*	LED1 full ON
		3:0	LED1_ON_H[3:0]	R/W	0000*	LEDn_ON count for LED1, 4 MSBs
0Ch	LED1_OFF_L	7:0	LED1_OFF_L[7:0]	R/W	0000 0000*	LEDn_OFF count for LED1, 8 LSBs
0Dh	LED1_OFF_H	7:5	reserved	R	000*	non-writable
		4	LED1_OFF_H[4]	R/W	1*	LED1 full OFF
		3:0	LED1_OFF_H[3:0]	R/W	0000*	LEDn_OFF count for LED1, 4 MSBs
0Eh	LED2_ON_L	7:0	LED2_ON_L[7:0]	R/W	0000 0000*	LEDn_ON count for LED2, 8 LSBs
0Fh	LED2_ON_H	7:5	reserved	R	000*	non-writable
		4	LED2_ON_H[4]	R/W	0*	LED2 full ON
		3:0	LED2_ON_H[3:0]	R/W	0000*	LEDn_ON count for LED2, 4 MSBs
10h	LED2_OFF_L	7:0	LED2_OFF_L[7:0]	R/W	0000 0000*	LEDn_OFF count for LED2, 8 LSBs
11h	LED2_OFF_H	7:5	reserved	R	000*	non-writable
		4	LED2_OFF_H[4]	R/W	1*	LED2 full OFF
		3:0	LED2_OFF_H[3:0]	R/W	0000*	LEDn_OFF count for LED2, 4 MSBs
12h	LED3_ON_L	7:0	LED3_ON_L[7:0]	R/W	0000 0000*	LEDn_ON count for LED3, 8 LSBs
13h	LED3_ON_H	7:5	reserved	R	000*	non-writable
		4	LED3_ON_H[4]	R/W	0*	LED3 full ON
		3:0	LED3_ON_H[3:0]	R/W	0000*	LEDn_ON count for LED3, 4 MSBs
14h	LED3_OFF_L	7:0	LED3_OFF_L[7:0]	R/W	0000 0000*	LEDn_OFF count for LED3, 8 LSBs
15h	LED3_OFF_H	7:5	reserved	R	000*	non-writable
		4	LED3_OFF_H[4]	R/W	1*	LED3 full OFF
		3:0	LED3_OFF_H[3:0]	R/W	0000*	LEDn_OFF count for LED3, 4 MSBs
16h	LED4_ON_L	7:0	LED4_ON_L[7:0]	R/W	0000 0000*	LEDn_ON count for LED4, 8 LSBs
17h	LED4_ON_H	7:5	reserved	R	000*	non-writable
		4	LED4_ON_H[4]	R/W	0*	LED4 full ON
		3:0	LED4_ON_H[3:0]	R/W	0000*	LEDn_ON count for LED4, 4 MSBs

Рис. 12. Протокол взаимодействия с PCA9685

Сам модуль настраивается переводом в режим настройки посредством подачи высокого сигнала EN перед включением модуля, настройка осуществлялась посредством АТ-команд, описанных в документации модуля.

Мобильное приложение. Для удобного взаимодействия с роботом было создано мобильное приложение. Приложение позволяет управлять движением робота, руки-манипулятора и осуществлять захват и отпускание предметов. Джойстики посылают команды с указанием отклонения от 0 до 100%, что позволяет контролировать скорость двигателей. Левый джойстик используется для движения и поворота самого робота, а правый – для поворота и наклона манипулятора. Имеются кнопки для зажатия и отпускания предметов в клешне. Интерфейс приложения отображён на рис. 2.



Рис. 2. Интерфейс мобильного приложения

Конечная схема подключения всех модулей робота представлена на рис. 3.

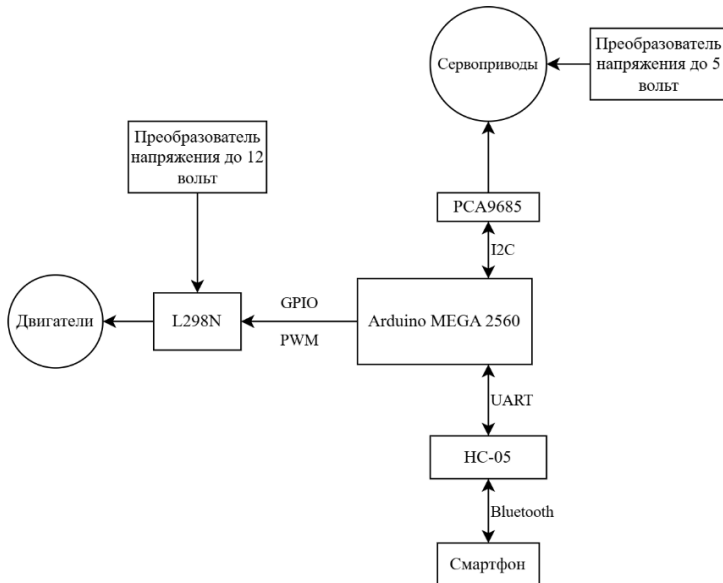


Рис. 3. Схема взаимодействия основных частей робота

После написания программного кода, объединяющего все выше-описанные модули, роботом стало возможно управлять через мобильное приложение.

Заключение. В рамках данной работы был реализован функционал, позволяющий пользоваться платформой как полноценным роботом. Однако омни-колёса, имеющиеся у данного робота, не были реализованы в данной работе, так как без дополнительных драйверов двигателей невозможно управлять каждым двигателем по отдельности. В дальнейшем планируется добавить дополнительные драйвера двигателей, чтобы реализовать функционал движения боком.

ЛИТЕРАТУРА

1. Техническая документация микросхемы L298N [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf> (дата обращения: 27.02.2025).
2. Техническая документация микросхемы PCA9685 [Электронный ресурс]. – URL: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/PCA9685.pdf> (дата обращения: 27.02.2025).
3. Техническая документация модуля HC-05 [Электронный ресурс]. – URL: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/HC-05%20Datasheet.pdf (дата обращения: 27.02.2025).

УДК 621.7

ИНТЕГРАЦИЯ ЧПУ ФИРМЫ «ОВЕН» С ФРЕЗЕРНЫМИ СТАНКАМИ +GF+ MICRON

А.Е. Милютин, И.С. Сурков, студенты;

А.А. Изюмов, ст. преп. каф. КСУП

*Научный руководитель В.П. Коцубинский, доцент каф. КСУП, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, anton.izyumov@gmail.com,
kvp@kcup.tusur.ru*

Рассматриваются возможности интеграции отечественных систем числового программного управления (ЧПУ) фирмы «ОВЕН» с фрезерными станками +GF+ Micron, используемыми на предприятии АО «ТЭМЗ».

Ключевые слова: ЧПУ, Heidenhain, ОВЕН, фрезерные станки, автоматизация, импортозамещение, модернизация оборудования.

В рамках изучения числового программного управления (ЧПУ) в ходе производственной практики на предприятии АО «ТЭМЗ» были рассмотрены фрезерные станки +GF+ Micron VCE800, +GF+ Micron VCE1600 (рис. 1), +GF+ Micron MILL E700 (относящиеся к категории трёх- и пятиосевых фрезерных станков) с УЧПУ, использующие си-

системы Heidenhain iTNC 530 и TNC 640 [1]. Данные УЧПУ позволяют значительно упростить и ускорить написание программ за счёт встроенных циклов. Циклы представляют собой готовые программы для различных методов обработки заготовки. Однако учитывая современные тенденции автоматизации и импортозамещения, актуальным является вопрос интеграции отечественных систем ЧПУ, таких как разработки фирмы «ОВЕН».

Фирма «ОВЕН» разрабатывает отечественные ПЛК, предназначенные в том числе для модернизации металлообрабатывающих станков. Эти системы поддерживают работу с различными типами оборудования, включая фрезерные и токарные станки. Они совместимы с отечественными и зарубежными станками, поддерживают G-коды и макропрограммирование, обладают русскоязычным интерфейсом и интегрируются с CAD/CAM-системами [2].

Ключевые коммуникативные возможности ПЛК «ОВЕН»:

- Ethernet;
- поддержка промышленных протоколов Modbus RTU/ASCII/TCP, OPC UA (Server), MQTT (client), SNMP (Manager/Agent);
- поддержка прикладных протоколов NTP, FTP, FTPS, HTTP, HTTPS, SSH, SMTP/IMAP/POP3, OpenVPN, WireGuard;
- возможность подключения к СУБД MySQL и MsSQL.



Рис. 1. Внешний вид +GF+ Micron VCE1600

Процесс модернизации управления фрезерными станками +GF+ Micron при переходе на ЧПУ «ОВЕН» включает следующие этапы:

1. Анализ текущей системы и требований:

- Изучение TNC 640: Определение функций, которые выполняет текущее ЧПУ (управление осями, обработка G-кодов, взаимодействие с сервоприводами, датчиками, системами охлаждения и т.д.).

- Технические характеристики станка: анализ параметров Micron MILL E700 (интерфейсы, протоколы связи, типы двигателей, датчиков, требования к питанию).

- Выбор аналога ОВЕН: Подбор совместимого оборудования (например, ПЛК ОВЕН, или специализированное ЧПУ, например, СПК202/СПК207). Проверка поддержки протоколов (Modbus, CANopen, Ethernet/IP) и совместимости с компонентами станка.

2. Подготовка к переходу:

- Документация и поддержка:
 - получение технической документации от ОВЕН;
 - согласование с производителем ОВЕН возможности интеграции их оборудования;
 - планирование участия инженеров ОВЕН для настройки и пуска наладки.
- Закупка оборудования: Приобретение необходимых компонентов (ЧПУ/ПЛК, модули ввода-вывода, преобразователи интерфейсов).
- Резервное копирование: сохранение текущих программ и параметров TNC 640.

3. Демонтаж TNC 640:

- Отключение питания станка.
- Аккуратный демонтаж компонентов TNC 640 с сохранением кабелей и разъемов для возможного обратного перехода.
- Маркировка проводов для упрощения подключения новой системы.

4. Установка оборудования ОВЕН:

- Монтаж аппаратной части:
 - установка ПЛК/ЧПУ ОВЕН в шкаф управления;
 - подключение к сервоприводам, датчикам, системам охлаждения и другим компонентам через совместимые интерфейсы;
 - настройка источников питания (при необходимости).
- Программная настройка:
 - установка ПО ОВЕН (CoDeSys, LOGIKA и др.);
 - написание/адаптация управляющих программ под язык ОВЕН (например, LD, FBD, ST);
 - конфигурация связи с периферийными устройствами.

5. Калибровка и тестирование:

- Калибровка осей: настройка нулевых точек, проверка точности позиционирования.
- Тестовые запуски:
 - проверка работы шпинделя, подачи СОЖ, перемещений по осям;
 - выполнение простых программ для оценки точности и стабильности.
- Корректировка параметров: оптимизация скоростей, ускорений, PID-регуляторов сервоприводов.

6. Интеграция с ПО:

- Перенос или адаптация G-кодов под новую систему (при необходимости использование конвертеров или ручное редактирование).

- Настройка САМ-систем для генерации кодов, совместимых с ОВЕН.

7. Обучение персонала:

- Проведение тренингов для операторов и техников:

- основы работы с интерфейсом ОВЕН;
- написание и редактирование управляющих программ;
- диагностика и устранение неисправностей.

8. Пробная эксплуатация

- Запуск пробной партии деталей для проверки качества обработки.

- Сбор обратной связи от операторов и внесение финальных корректировок.

9. Документирование и сдача проекта:

- Составление отчетов по настройкам, параметрам и изменениям.
- Передача документации заказчику.

При переходе неизбежно возникнут сложности. Отметим их и возможные пути решения:

- несовместимость протоколов: использование промежуточных преобразователей (например, Modbus-RS485 в Ethernet);

- различия в ПО: адаптация алгоритмов управления под логику ОВЕН;

- простой оборудования: минимизация времени перехода за счет предварительной настройки компонентов.

Несмотря на сложность процесса, интеграция отечественной системы ЧПУ имеет ряд преимуществ:

1. Импортозамещение, что снижает зависимость от зарубежных поставщиков и позволяет решить задачу санкционного давления со стороны недружественных стран, особенно учитывая, что АО «ТЭМЗ» – крупный подрядчик по ГОЗ.

2. Снижение затрат на обслуживание и обновление программного обеспечения.

3. Более доступная техническая поддержка и документация на русском языке.

4. Гибкость в модернизации, возможность доработки системы под нужды производства.

Заключение. Станки +GF+ Micron, используемые на АО «ТЭМЗ», могут быть модернизированы с использованием ЧПУ фирмы «ОВЕН». Такая интеграция требует адаптации управляющих программ, настройки интерфейсов передачи данных и тестирования системы.

Применение отечественных систем управления позволит повысить независимость от зарубежных технологий, снизить расходы на обслуживание и обеспечить поддержку отечественного производителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Техническая информация о ЧПУ Heidenhain iTNC 530 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.heidenhain.com> (дата обращения: 10.03.2025).
2. Официальный сайт компании «ОВЕН» [Электронный ресурс]. – URL: https://owen.ru/catalog/programmiruemie_logicheskie_kontrolleri (дата обращения: 10.03.2025).

УДК 623

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА

А.А. Ярцева, курсант; А.В. Лубенцов, проф. каф. ОРЭ, к.г.н.

*г. Воронеж, Воронежский институт ФСИН России,
lubensov@mail.ru*

Исследование охватывает различные направления применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), среди которых выделяются военные операции, аграрный сектор, транспортно-логистические процессы, экологический мониторинг и задачи гражданской обороны. Для каждой из этих областей проведена оценка достоинств и недостатков использования БПЛА, а также определены тенденции и возможности их будущего развития.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, применение БПЛА, технологии, автономность, искусственный интеллект.

Современный мир переживает небывалый расцвет беспилотной авиации, настоящий технологический взрыв, обусловленный стремительным развитием нескольких ключевых областей. Речь идет о революционных достижениях в микропроцессорной технике, обеспечивающих достаточно высокую вычислительную мощность при миниатюризации компонентов; о прорыве в системах навигации, позволяющих беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) ориентироваться в пространстве с поразительной точностью даже в условиях сложного рельефа и неблагоприятных погодных условий; о грандиозном прогрессе в сфере информационных технологий, обеспечивающих бесперебойную связь, обработку больших объемов данных и дистанционное управление; и, наконец, о стремительном развитии искусственного интеллекта, который наделяет БПЛА способностью к автономному принятию решений, планированию маршрута, распознаванию объектов и реагированию на изменяющуюся обстановку.

Системный анализ моделей применения. БПЛА – это техническая система, представляющая собой летательный аппарат, способный

выполнять сложные задачи без присутствия человека на борту. Уровень автономности этих систем варьирует от полностью управляемых оператором в режиме реального времени до полностью автономных аппаратов, способных самостоятельно планировать и выполнять миссии, основываясь на заложенных алгоритмах и собранных данных. Сегодня БПЛА стали неотъемлемой частью нашей жизни, нашедшей применение в самых различных сферах деятельности, повышая эффективность и расширяя возможности в областях, которые ранее были недоступны или крайне сложны для освоения.

Применение БПЛА обеспечивает беспрецедентную эффективность в таких задачах, как разведка, наблюдение, поиск и спасение, контроль территорий, мониторинг окружающей среды и проведение научных исследований. Их уникальные характеристики, такие как длительное время полета (некоторые модели способны находиться в воздухе десятки часов без дозаправки), значительно более низкая стоимость по сравнению с пилотируемыми аналогами, высокая точность наведения и невероятная маневренность, делают их незаменимым инструментом во многих отраслях.

Выбор конкретного типа БПЛА напрямую зависит от специфики задачи. Многообразие конструкций и технических характеристик БПЛА поистине поражает. Существуют аппараты самолетного типа, отличающиеся высокой скоростью и дальностью полета, мультироторные БПЛА, известные своей маневренностью и возможностью вертикального взлета и посадки, гибридные модели, сочетающие преимущества разных типов, и многие другие.

Каждый тип имеет свои преимущества и недостатки, что делает выбор оптимального решения крайне важной задачей для достижения максимальной эффективности. Военная сфера является одним из ключевых потребителей БПЛА. Здесь применяются как самолетные, так и мультироторные аппараты, выполняющие задачи разведки, наблюдения за позициями противника, корректировки артиллерийского огня, подачи целеуказания для высокоточного оружия и даже непосредственного поражения целей. Применение БПЛА в военных действиях значительно повышает эффективность боевых операций, снижая потери среди личного состава и позволяя получать оперативную информацию о ситуации на поле боя. Высокая точность и возможности скрытного наблюдения делают БПЛА одними из самых эффективных систем в современной военной стратегии.

Гражданское применение БПЛА также весьма обширно. В промышленной сфере дроны используются для инспекции высоковольтных линий электропередачи, контроля состояния трубопроводов, об-

следования труднодоступных объектов инфраструктуры – мостов, плотин, высотных зданий. Это позволяет проводить технические осмотры без необходимости использования специальной техники и значительно снижает риски для жизни и здоровья людей. В сельском хозяйстве БПЛА применяются для мониторинга состояния посевов, анализа почвы, определения областей, нуждающихся в дополнительном поливе или удобрении, выявления болезней растений и своевременного реагирования на них.

Точность и оперативность информации, получаемой с помощью БПЛА, позволяют существенно повысить урожайность и снизить затраты на сельскохозяйственные работы. Нефтегазовая промышленность активно использует беспилотники для обследования трубопроводов, мониторинга состояния нефте- и газодобывающих установок, поиска утечек и контроля за состоянием окружающей среды. Строительство также нашло широкое применение для БПЛА, используя их для топографических съемок, контроля хода строительных работ, мониторинга безопасности и прочих задач.

В сфере логистики дроны применяются для доставки грузов, особенно в труднодоступных районах, обеспечивая быструю и эффективную доставку товаров и материалов. Развитие искусственного интеллекта открывает еще более широкие возможности для применения БПЛА в различных областях, позволяя автоматизировать многие процессы и значительно повысить эффективность работы.

Заключение. Необходимо отметить, что беспилотная авиация динамично развивается, постоянно расширяя сферу своего применения и трансформируя многие отрасли экономики. Прогресс в области искусственного интеллекта, информационных технологий и микроэлектроники обеспечивает постоянное совершенствование БПЛА, делая их все более эффективными, безопасными и доступными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лубенцов А.В. Модель применения беспилотных летальных аппаратов в целях обеспечения безопасности объектов уголовно-исполнительной системы / А.В. Лубенцов, А.А. Ярцева // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXX Междунар. науч.-техн. конф.: в 5 т., Воронеж, 16–18 апреля 2024 г. – Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2024. – С. 227–232.
2. Варламов А.С. Перспективы развития систем и средств комплексов с беспилотными летательными аппаратами / А.С. Варламов, А.В. Седых, Д.С. Бачурин // Молодой ученый. – 2023. – № 47 (494). – С. 25–27 [Электронный ресурс]. – URL: <https://moluch.ru/archive/494/108015/> (дата обращения: 08.03.2024).
3. Лиско В.В. Современная беспилотная техника – М.: АСТ, 2023. – С. 95–131.

Секция 1

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Подсекция 1.1

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Председатель – Аникин А.С., доцент каф. РТС, к.т.н.;
зам. председателя – Мещеряков А.А., доцент каф. РТС, к.т.н.

Ю.М. Зубарь, Р.М. Абсалямов

Удобства и преимущества в применении макетных плат
для организации лабораторных работ по схемотехнике.....25

М.П. Неволин

Анализ методов повышения помехозащищенности сети радиосвязи
в условиях электронной борьбы28

Т.Н. Пушкарёв

Система идентификации беспилотных летательных аппаратов31

А.В. Лубенцов

Системный анализ чувствительности параметров оценки сложных
технических систем33

Подсекция 1.2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Председатель – Озёркин Д.В., доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.;
зам. председателя – Понамарев Д.Е., преп. каф. КИПР

И.Г. Быков

Импортозамещение систем автоматизированного проектирования
на Delta Design.....37

Е.М. Ивашкина

Создание и исследование микрополоскового фильтра.....40

Д.А. Пичугин

Синтез программной модели LDPC-декодера
на основе алгоритма Normalized min-sum42

Т.Н. Пушкарёв

Современные проблемы технической эксплуатации воздушных судов46

Т.Н. Пушкарёв

Алгоритм для определения места неисправности радиоэлектронного
оборудования.....49

Е.А. Рожкова Проектирование компактной антенной решетки для системы связи малых спутников.....	51
Е.А. Рожкова Эффективность применения бортового радиотехнического комплекса в системах спутниковой навигации.....	55
Д.А. Шелягин Применение носимой электроники для предотвращения сна за рулём мотоцикла	58
Н.И. Тарасов Система непрерывного мониторинга радиосредств серии «Фазан-19»	60
К.С. Заверин, Н.В. Тимкин Разработка многофункционального беспилотного летательного аппарата	65
Н.К. Монастырёв, Л.Ю. Войко Использование концепции цифрового двойника в испытаниях радиоэлектронной аппаратуры	68
В.Н. Федоров, А.Д. Яковенко Система управления летательной платформой длительного размещения оборудования на высоте	71
И.А. Попков, С.Н. Столяров Металлоискатель на базе Arduino.....	73

Подсекция 1.3

РАДИОТЕХНИКА

*Председатель – Семенов Э.В., проф. каф. РСС, д.т.н., доцент;
зам. председателя – Артищев С.А., и.о. зав. каф. КУДР, к.т.н.*

Д.В. Борисов, А.А. Коколов разработка двойного балансного смесителя с интегрированным усилителем сигнала гетеродина на основе КМОП-технологии.....	76
М.А. Миягашев, Ф.И. Шеерман, А.А. Коколов Разработка преобразователя последовательного интерфейса I2C в 8-битный параллельный двунаправленный порт на основе отечественной КМОП-технологии.....	80
Г.И. Мурачев Использование SDR-системы для обнаружения БПЛА	84
М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов, Г.П. Золкин, С.Н. Паршин Анализ влияния пластмассовых покрытий на S-параметры антенн беспилотных летательных аппаратов.....	87

<i>М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов, Г.П. Золкин, С.Н. Паршин</i>	
Исследование влияния полимерных покрытий антенн на их частотный диапазон	90
<i>Н.С. Шидловский</i>	
Исследование причин возникновения и анализ помех в работе PLC-модемов	93
<i>П.Н. Федоров, Д.Э. Андрусив, И.Е. Титков, Ю.А. Кудрявцева</i>	
Применение алгоритма адаптации антенной решетки в условиях дестабилизирующих факторов	98
<i>Н.И. Крамаренко</i>	
«Асимметрические» созвездия фазовой модуляции	100
<i>А.Е. Левковский, Г.О. Лунев, Е.В. Михайленко</i>	
Обзор GaN-технологий при изготовлении малошумящих усилителей на монолитных интегральных схемах	103
<i>С.С. Журавлев, Н.О. Кузьмин, К.Н. Роцин, Е.В. Андронов</i>	
Метод оценки EVM по неравномерностям АЧХ и ФЧХ	106

Подсекция 1.4

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Председатель – Курячий М.И., проф. каф. ТУ, к.т.н., с.н.с.;
зам. председателя – Каменский А.В., доцент каф. ТУ, к.т.н.

<i>Д.М. Батенко</i>	
Сравнение алгоритмов автоматического отслеживания объектов по входному видеопотоку	110

Подсекция 1.5

СИСТЕМЫ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ И ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Председатель – Рогожников Е.В., зав. каф. ТОР, к.т.н.;
зам. председателя – Дмитриев Э.М., ст. преп. каф. ТОР

<i>Д.А. Вычужанин, Е.Ф. Замерчук, Н.В. Котюков, В.А. Курандин, Е.Е. Халтурин, Р.О. Хушкадамов</i>	
Разработка инновационного рюкзака для более удобной, безопасной и организованной жизни студентов ТУСУРа	115
<i>И.В. Гридин, Н.А. Иванников</i>	
Программное обеспечение для поиска потерявшегося человека в лесном массиве	117

В.И. Горохов, А.Д. Рязанов MQTT как основа построения мультитехнологичных IoT-систем: интеграция с другими протоколами и сервисами	121
Б.С. Лещинский, Н.А. Васильев, Д.С. Ситдиков Сравнение технологий LPWAN для IoT	124
Д.А. Зырянов Интеграция IoT-технологий и Telegram-бота для удаленного мониторинга температурного режима холодильных камер	127

Подсекция 1.6

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

*Председатель секции – Шурыгин Ю.А., советник
при ректорате по комплексным вопросам
функционирования университета, д.т.н., проф.;*
зам. председателя – Черкашин М.В., доцент каф. КСУП, к.т.н.

К.Н. Полушвайко, А.А. Зуевич, А.С. Кученко, К.А. Ларионов Модификация алгоритма поиска порядка включения секций многоуровневых СВЧ-устройств	130
В.Е. Борнашов, И.А. Данилов, Н.Е. Исaiченко, А.Е. Горяинов Внедрение модуля отрисовки принципиальных схем для САПР СВЧ-устройств	132
И.А. Данилов, Н.Е. Исaiченко, В.Е. Борнашов, А.Е. Горяинов Задача автоматической расстановки УГО-элементов принципиальных схем в рабочем пространстве САПР	136
В.Д. Боровкова, К.А. Ларионов, А.С. Кученко, А.Е. Горяинов Модификация программы экспорта моделей СВЧ-компонентов PDK Bridge	138
К.А. Ларионов, В.Д. Боровкова, К.Н. Полушвайко, А.Е. Горяинов Реализация экспорта топологий СВЧ-компонентов с использованием API САПР СВЧ-устройств	141
Н.Е. Исaiченко, В.Е. Борнашов, И.А. Данилов, А.Е. Горяинов Модификация модуля экспорта принципиальных схем для САПР СВЧ-устройств	143
А.А. Зуевич, К.Н. Полушвайко, Т.Р. Рафиков, В.Д. Боровкова Расширение функциональности программы деэмбединга результатов измерений СВЧ-компонентов	146
К.Д. Юркина Системный анализ отдельных топологий ЛВС	149

Секция 2

ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Подсекция 2.1

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИМЕДИЦИНСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ И НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Председатель – Еханин С.Г., проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н., доцент;
зам. председателя – Славникова М.М., доцент каф. КУДР*

<i>А.А. Кобызева</i>	
Алгоритм обнаружения пиков фотоплетизмограммы	153
<i>Д.В. Шмаков, А.Д. Таренков, Р.Ю. Журавлёв</i>	
Способ изготовления эластичных нагревателей для высокотемпературного лечения саркомы костей	156
<i>А.А. Швадленко, Н.Ф. Яровая</i>	
Определение изотопного состава порошкового хлорида калия	158
<i>Е.В. Парахина, А.А. Швадленко</i>	
Определение внутренней квантовой эффективности светоизлучающих диодов по динамическим характеристикам	160
<i>А.М. Коновалов, И.В. Зелинский, Е.И. Тренкаль, А.В. Берестов, Ш.Д. Ахмедов</i>	
Преимущества использования эпикардальных электродов для мониторинга ЭКГ в раннем послеоперационном периоде у пациентов кардиохирургического профиля	163
<i>Н.М. Мироненко, А.И. Солдатов, С.И. Борталевич, К.Х. Зоидов</i>	
Влияние поверхностного потенциала медицинских имплантов на их приживаемость (обзор)	166

Подсекция 2.2

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

*Председатель – Бомбизов А.А., начальник СКБ «Смена», к.т.н.;
зам. председателя – Тренкаль Е.И., доцент каф. КУДР, к.т.н.*

<i>А.А. Артюшин, А.М. Телегин</i>	
Построение системы для измерения распределения поверхностного заряда на обшивке космического аппарата	170
<i>И.А. Деев, К.А. Чеботарёв, М.А. Маджиль</i>	
Компактная установка контроля метеорологических характеристик MeteoCube	173

Подсекция 2.3

ФИЗИЧЕСКАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Председатель – Троян П.Е., проф. каф. ФЭ, д.т.н.;

зам. председателя – Смирнов С.В., проф. каф. ФЭ, д.т.н.

А.К. Нестеренко, А.А. Андронов Формирование керамических покрытий на основе YSZ-керамики в форвакуумной области давлений	175
А.В. Долгова, А.А. Зенин Влияние давления рабочего газа на минимальное значение диаметра электронного пучка при его фокусировке в форвакуумной области давлений	178
М.М. Михайлов, Д.С. Федосов, В.А. Горончко, А.Н. Лапин, С.А. Юрьев, С.П. Иваничко Влияние флюенса электронов на изменение оптических свойств порошка CaSiO_3 , модифицированного наночастицами CeO_2	181
Г.А. Касьянов, А.С. Климов, И.Ю. Бакеев, А.А. Лыман Отклонение сфокусированного электронного пучка поворотной магнитной катушкой	185
Ю.С. Жидик, А.В. Москалев Исследование характеристик плазмы газового разряда при осаждении низкоомных пленок ИТО методом реактивного магнетронного распыления	187
А.В. Казаков, Н.А. Панченко, А.Е. Петров Характеристики поверхности керамики на основе диоксида циркония после обработки импульсным электронным пучком в форвакуумной области давлений	190
А.Е. Шестериков, Д.А. Шестерикова Уменьшение длины затвора за счет формирования пристеночного диэлектрика на основе нитрида кремния в технологии GaN-HEMT	194
А.А. Шупенёв, А.А. Есипов Перспективы и тенденции развития силовых транзисторов на основе GaN	198
Т.А. Акулинин, А.А. Есипов, А. Шупенёв Исследование и оптимизация способов отвода тепла от канала транзистора для снижения температуры полупроводниковых структур	201
Ф.А. Суховольский, Л.Ж. Нгон А Кики Кремний-углеродные покрытия, полученные электронно-лучевым испарением карбида кремния в разных газах	204
А.В. Казаков, Н.А. Панченко, А.С. Попова, А.В. Тюньков, Исследование формирования импульсного электронного пучка форвакуумным плазменным источником на основе контрагированного дугового разряда	207
А.С. Терехова, Л.А. Зеленский Устройство для измерения термоЭДС наноразмерных проводящих пленок	210

Подсекция 2.4

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Председатель – Семенов В.Д., проф. каф. ПрЭ, к.т.н., с.н.с.;

зам. председателя – Михальченко С.Г., зав. каф. ПрЭ, д.т.н.;

Оскирко В.О., технический директор

ООО «Прикладная электроника», к.т.н.

Н.Д. Егорова

Адгезионные свойства токопроводящего клея
на покрытии никель-золото213

Н.Д. Егорова

Проверка устойчивости клеевых соединений
при воздействии цикла испытаний216

В.М. Стяжков, А.А. Инцаки, А.В. Кузнецова

Сравнение аккумуляторов и суперконденсаторов: энергетическая
эффективность и перспективы использования в умной розетке219

В.С. Чистяков, А.Р. Низамиева, Н.С. Жукова

Система автоматического полива на базе Arduino «Оазис»222

Ю.Ф. Савчук, М.М. Поддубный

Автонастройка и прогнозирование параметров
для систем управления бесколлекторных двигателей225

Ф.С. Серов, М.А. Пашков, А.С. Поволоцкий, С.С. Березовский,

Н.Е. Юнгблут, Л.В. Жданов, Д.В. Федотов

Умный дом на Arduino227

Подсекция 2.5

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАНОФОТОНИКА И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА

Председатель – Перин А.С., директор передовой инженерной школы

«Электронное приборостроение и системы связи»

им. А.В. Кобзева, доцент каф. СВЧМКР, к.т.н.;

зам. председателя – Долгирев В., ассистент каф. СВЧМКР,

инженер ЛФИС

Ф.М. Гончаров, А.Е. Ефимов

Моделирование фотонного интегрального фильтра для задач
квантового распределения ключа на боковых частотах
с использованием отечественного программного обеспечения230

Н.В. Измайлова, Л.Г. Самсонова, Р.М. Гадиров

Фотогенерация кислоты производными бензотиофена
при облучении 3-й гармоникой NdYAG-лазера233

*А.Ю. Кальсин, Е.С. Слюнько, С.Н. Подзвальный,
А.Б. Лысенко, Н.Н. Юдин*

Изменение порога оптического пробоя нелинейных кристаллов
ZnGeP₂ при воздействии низкотемпературной плазмы 235

В.И. Крутов

Моделирование влияния размеров зерен ниобата лития и их ориентации
на оптические потери в поликристаллическом волноводе 237

Д. Шарба

Теоретический обзор о металлинзах 240

Д.В. Емельянов, И.А. Гуляев

Обзор способов генерации второй гармоники в тонкоплёночном
ниобате лития на изоляторе 243

Подсекция 2.6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Председатель – Суровцев Р.С., доцент каф. ТУ, к.т.н.;
зам. председателя – Белоусов А.О., доцент каф. ТУ, к.т.н.

М.Е. Дорогов, В.А. Фецуков

Модернизация архитектуры и интерфейса программного модуля для оценки
эффективности экранирования корпусов радиоэлектронных средств 247

М.Е. Дорогов, В.А. Фецуков

Прототип модуля лицензирования и авторизации системы TUSUR.EMC ... 250

К.С. Лукас, Т.Ф. Данг

Сравнение реализации разреженных антенн, рассеивателей
и экранов из проводных сеток 253

Р.Б. Михо

Сравнение методов вычисления индуктивности
одиночного переходного отверстия многослойной печатной платы 257

М.С. Мурманский

Анализ временных характеристик интегральной линии передачи
в виде спирали 259

Г.М. Подхомутникова, А.Ф. Лекарев, И.С. Костарев

Имитационная модель электромагнитного экранирования
корпусом радиоэлектронной аппаратуры 262

Подсекция 2.7

СВЕТОДИОДЫ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Председатель – Туев В.И., зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н., проф.;
зам. председателя – Солдаткин В.С., доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.

А.А. Иванова

Система фотобиомодуляции 268

<i>М.А. Аксенович, Р.С. Елсуков, В.С. Сафонов</i> Дистанционно управляемый LED-дисплей для сложных условий эксплуатации	270
<i>И.А. Благих, К.Д. Франк</i> Объединение технологий 3D-печати для крупногабаритных деталей	273
<i>А.А. Буймов, А.А. Иванова</i> Полупрозрачный светодиодный дисплей	276
<i>В.А. Мильто, Т.А. Тарасенко</i> Внедрение дополнительного функционала для печатных узлов навигационных огней	279
<i>Н.А. Репников, А.В. Пономарева</i> Полимерные материалы для использования в светоизлучающей диоде	282
<i>Е.С. Урин, С.Е. Пивоваров, М.Ю. Сокольников</i> Система отслеживания занятости туалетной кабинки «Припудрить носик»	284

Подсекция 2.8

РОБОТОТЕХНИКА

Председатель – Коцубинский В.П., доцент каф. КСУП, к.т.н.;
зам. председателя – Шандаров Е.С., ст. преп. каф. ЭП

<i>Т.В. Ветров, А.Д. Тюлькин, А.В. Фатеев, Ю.Р. Ананин</i> Манипулятор на базе Arduino MEGA 2560.....	288
<i>Д.А. Осипенко, В.А. Боцман, В.П. Коцубинский</i> Практика решения задачи о максимальном потоке с использованием алгоритма Диница	291
<i>В.С. Дорофеев</i> Акустическое позиционирование робототехнических комплексов с применением псевдошумовых сигналов	293
<i>А.К. Городилов</i> Разработка робота-аниматора на платформе Robotis Engineer.....	296
<i>М.М. Кадышев</i> Использование камеры технического зрения TrackingCam для решения задач лиги «Роботы-спасатели» линии чемпионата RoboCup ..	299
<i>А.О. Кудрявцев, В.А. Фукалов</i> Обзор принципов работы современных лидарных систем и их применения в системах автоматизированного управления автомобилем.....	303
<i>Ю.Н. Михайлова</i> Использование камеры технического зрения TrackingCam для решения задач соревнований по футболу человекоподобных роботов.....	306
<i>С.О. Винокурова, Д.А. Осипенко, А.А. Изюмов, Ю.А. Шурыгин</i> Специфика программирования камеры PiXu по сравнению с другими камерами компьютерного зрения	309

<i>Е.С. Попадайкин, Н.А. Килин, С.В. Михнюк, Ю.А. Шурыгин</i>	
Интеграция микроконтроллеров Arduino	312
<i>Д.А. Сопяженец, Д.Г. Петракевич, М.Е. Шведов, А.А. Изюмов</i>	
Радиоуправляемый робот с манипулятором на базе Arduino MEGA 2560 ...	315
<i>А.Е. Милютин, И.С. Сурков, А.А. Изюмов</i>	
Интеграция ЧПУ фирмы «ОВЕН» с фрезерными станками +GF+ Micron ...	319
<i>А.А. Ярцева, А.В. Лубенцов</i>	
Системный анализ моделей применения БПЛА	323

Научное издание

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2025

**Материалы
международной научно-технической конференции
студентов, аспирантов и молодых ученых
«Научная сессия ТУСУР–2025»**

21–23 мая 2025 г., г. Томск

В четырех частях

Часть 1

Корректор – **В.Г. Лихачева**
Верстка **В.М. Бочкаревой**

Сдано на верстку 20.04.2025. Подписано к печати 15.05.2025.
Формат 60×84¹/₁₆. Печать трафаретная. Печ. л. 21
Тираж 100 экз. Заказ 3.

Издано ТУСУР (заказчик)
г. Томск, пр. Ленина, 40, к. 205, т. 70-15-24
Тираж отпечатан в типографии ТУСУРа
(для нужд всех структурных подразделений университета и авторов)

Ред.-изд. подготовка оригинал-макета в эл. виде
В-Спектр (ИП Бочкарева В.М., исполнитель)
ИНН 701701817754
634055, г. Томск, пр. Академический, 13-24,
тел. 8-905-089-92-40, эл. почта: bvm-1@list.ru