

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР



**ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2025»**

**г. Томск, 21–23 мая 2025 г.
(в трех 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)»

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР

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

21–23 мая 2025 г., г. Томск

В трех частях

Часть 1

ТУСУР
В-Спектр
Томск, 2025

УДК 621.37/.39+681.518 (063)

ББК 32.84я431+32.988я431

С 23

С 23 Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 21–23 мая 2025 г.: в 3 ч. – Томск: ТУСУР (заказчик); В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева, исполнитель), 2025. – Ч. 1. – 328 с.

ISBN 978-5-902958-38-3

ISBN 978-5-902958-39-0 (Ч. 1)

ISBN 978-5-902958-40-6 (Ч. 2)

ISBN 978-5-902958-41-3 (Ч. 3)

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР включает избранные доклады по итогам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Конференция посвящена 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 978-5-902958-38-3

ISBN 978-5-902958-39-0 (Ч. 1)

© ТУСУР, 2025

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР

по материалам

**Международной научно-технической конференции
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 Ин-та 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;
- Осирко 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»;
- Бобер 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 наноэлектронных 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 – Новохрёстов 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 Stanisлавович, 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 – 2.5).

2 часть – 2-я секция (подсекции 2.6 – 2.8); 3-я секция (подсекции 3.2 – 3.6); 6-я секция; 8-я секция.

3 часть – 4-я секция (подсекции 4.1 – 4.4); 5 секция (подсекция 5.1 – 5.8).

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. Начинаясь 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 металлокерамических 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, настроечные диоды с барьером Шоттки и монокристаллические интегральные схемы. На предприятии разработаны настроечные 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-, дециметрового 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 монокристаллических 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.

Продукция 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 сертификации, 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 г. 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 Тегга-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

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 Академия».

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 совершенствования 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, аттенюаторов, 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.

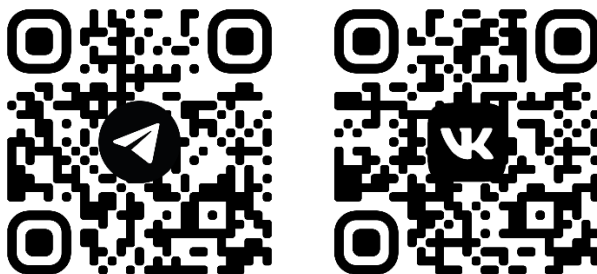
- **Моделирование электронных компонентов.** «50ohm Technologies» обладает большим опытом в создании точных моделей пассивных и активных компонентов, для полупроводниковых соединений группы $A^{III}B^V$. Компания поставляет эти модели в формате комплектов средств проектирования (PDK) для популярных САПР. 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 компонентов

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 – 200)

Секция 2
ЭЛЕКТРОНИКА
И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
(стр. 201 – 318)

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 621.396.669.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ПЕРЕДАВАЕМОГО ПАКЕТА НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КАНАЛА СВЯЗИ LORA

М.А. Ромащенко, проф., д.т.н.; Д.В. Васильченко, к.т.н.;
Р.С. Сухомлинов, К.М. Черкашин, студенты
г. Воронеж, ВГТУ, каф. КИПР, kipr@vorstu.ru

Изучено влияние уровня помехи на длину передаваемого пакета данных при различных значениях коэффициента расширения спектра. Проведенные экспериментальные измерения показали, что увеличение длины пакета снижает помехоустойчивость канала связи, увеличивая вероятность потери данных при увеличении помехи. Однако данный эффект может быть компенсирован увеличением коэффициента расширения спектра, что повышает устойчивость передачи, но при этом снижает скорость передачи данных за счет увеличения времени отправки пакета.

Ключевые слова: LoRa, канал связи, длина пакета, помехоустойчивость.

В настоящее время количество устройств, функционирующих в одном частотном диапазоне, постоянно растет. Такая тенденция напрямую ведет к вероятности возникновения помех, негативно вли-

яющих на работу устройств. Для устройств, требующих в своей работе высокой точности, даже незначительные искажения сигнала могут вызвать серьезные потери, а неправильно настроенные параметры передачи лишь усугубляют ситуацию [1]. Одним из решений, позволяющих справиться с подобными проблемами, является использование технологий связи с расширением спектра, одним из которых является, Long Range (LoRa).

Технология LoRa – это формат радиомодуляции, обеспечивающий передачу данных с высокой помехоустойчивостью. По сравнению с традиционной частотной модуляцией FSK (Frequency Shift Keying) технология LoRa использует метод расширения спектра, что позволяет добиться высокой стабильности сигнала при передаче на большие расстояния. Высокая дальность достигается комбинацией сразу нескольких решений. Во-первых, используется линейно-частотная модуляция (ЛЧМ), работающая по принципу увеличения ширины спектра передаваемого сигнала. Такое решение позволяет значительно снизить влияние помех и увеличить устойчивость к ним. Во-вторых, при модуляции сигнала, в сочетании с маскированием и перемежением, используется помехоустойчивое кодирование [2].

Для получения стабильного сигнала также важно правильно настроить основные параметры, напрямую влияющие на передаваемый сигнал. К ним относятся: полоса пропускания (BW), определяющая диапазон частот, занимаемый сигналом, коэффициент расширения спектра (SF), задающий число бит, закодированных в одном символе сигнала LoRa, и скорость кодирования (CR), характеризующая объем полезных данных, проходящих в одном бите информации.

Известно, что помеха увеличивает вероятность потери битов данных, повышая частоту возникновения ошибок в передаваемой информации. Для исключения подобной проблемы протокол LoRa использует контрольные суммы. Такой подход позволяет отбросить любые пакеты с ошибочными или отсутствующими битами. При этом важно понимать, что пакеты различной длины будут по-разному реагировать на наличие помехи. Длинные пакеты данных содержат большой объем информации, вследствие чего сильнее подвержены разрушению, в то время как короткие несут меньше полезной информации и значительный объем пакета уходит на заголовок. Целью данной работы является экспериментальная оценка зависимости длины передаваемого пакета на помехоустойчивость канала связи.

Для оценки влияния длины пакета LoRa на устойчивость канала связи был собран экспериментальный стенд. Для приёма и передачи использовались два аппаратных модуля LoRa, состоящие из модуля

LoRa SX1276, совмещенного с микроконтроллером ESP32 (рис. 1). В качестве помехи использовался белый гауссовский шум (AWGN), генерируемый программно-определяемым радио (SDR) Hack RF.

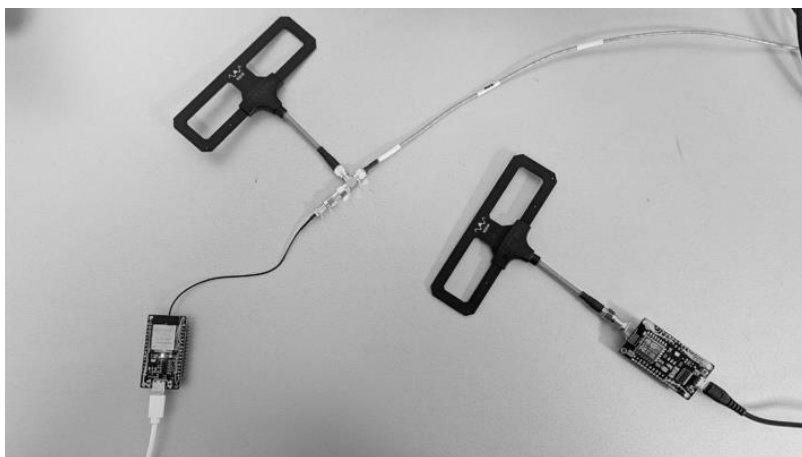


Рис. 1. Приемник и передатчик LoRa

В ходе эксперимента использовались антенны типа Мохон с коэффициентом усиления 5,5 дБи, обеспечивающие направленный характер излучения. Для измерения параметров анализатор спектра и приёмник подключались к общей антенне через согласованный разветвитель, что позволяло получить одинаковое значение отношения сигнал/шум (SNR) на входе приёмника и анализатора, необходимое для оценки параметров связи.

В рамках эксперимента длина пакета принимала значения 4, 32, 128 и 255 бит соответственно. Коэффициент расширения спектра изменялся от 7 до 12. Уровень помехи постепенно увеличивался до тех пор, пока отношение потерянных пакетов к полученным (PER) становилось равным 1, что означало полную потерю полезного сигнала [3].

На рис. 2 показана зависимость PER от длины пакета при SF = 7, а на рис. 3 – та же зависимость, но при SF = 12.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что отправка более длинных пакетов данных увеличивает вероятность потери пакета. Однако более высокое значение SF позволяет минимизировать потери даже при высоком уровне помехи. Так, при SF = 7 полезный сигнал полностью исчезает при SNR = -10, в то время как при SF = 12 устойчивая передача обеспечивается вплоть до SNR = -22. При всех преимуществах важно понимать, что данная закономерность

уменьшает скорость отправки сигнала, значительно повышая необходимое для нее время.

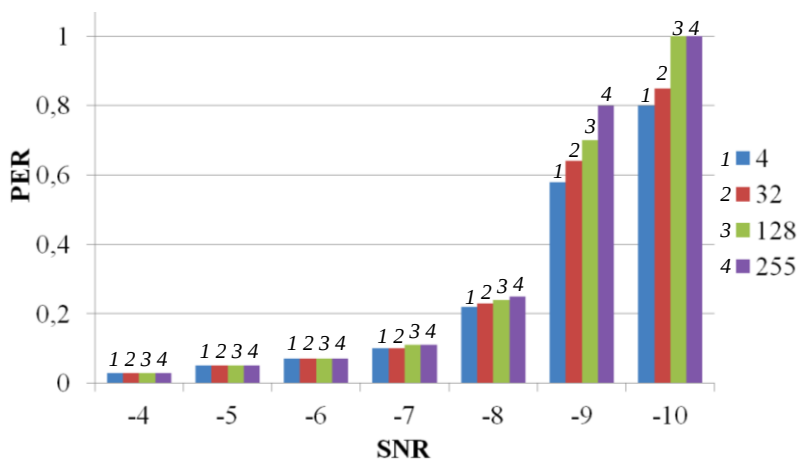


Рис. 2. Зависимость PER от длины пакета при SF = 7 и различных уровнях SNR

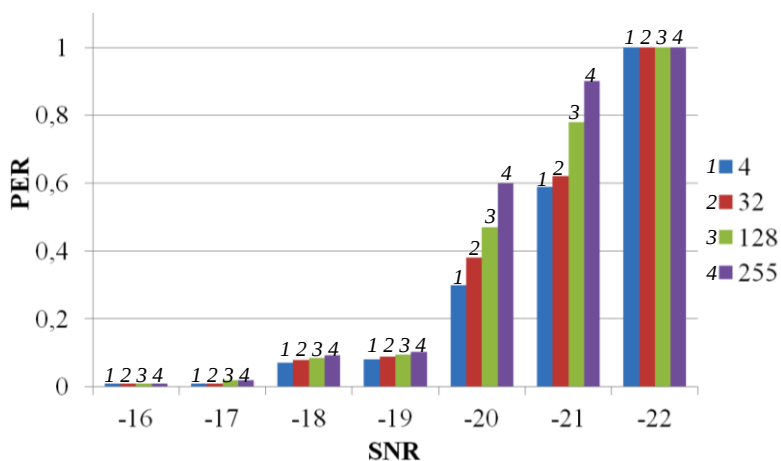


Рис. 3. Зависимость PER от длины пакета при SF = 12 и различных уровнях SNR

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ромащенко М.А. Современное состояние задач повышения помехоустойчивости канала управления беспилотных авиационных систем на основе искусственного интеллекта / М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 19, № 6. – С. 142–146.
2. Lora-alliance [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://loraalliance.org/>, свободный (дата обращения: 11.02.2025).
3. Guo Q. Experimental Evaluation of the Packet Reception Performance of LoRa / Q. Guo, F. Yang, J. Wei // Sensors 21. – 2021. – Vol. 21, No. 4. – P. 1071.

УДК 621.396.669.8

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ КОДИРОВАНИЯ LORA МОДУЛЯЦИИ НА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ КАНАЛА СВЯЗИ

***М.А. Ромащенко, проф., д.т.н.; Д.В. Васильченко, к.т.н.;
Р.С. Сухомлинов, К.М. Черкашин, студенты
г. Воронеж, ВГТУ, каф. КИПР, kpr@vorstu.ru***

Исследовано влияние скорости кодирования на помехоустойчивость канала связи при различных значениях коэффициента расширения спектра. Проведены экспериментальные измерения с использованием аппаратных модулей LoRa и генерации помехи в виде белого гауссовского шума. Анализ результатов показал, что снижение скорости кодирования при умеренном уровне помехи способствует увеличению помехоустойчивости. Однако при значительном нарастании помехи эффективность данного подхода снижается.

Ключевые слова: LoRa, канал связи, скорость кодирования, помехоустойчивость.

Рост актуальности беспроводных технологий и телекоммуникационных систем обусловлен увеличением плотности радиочастотных сетей. Такая тенденция приводит к возникновению взаимных помех между устройствами. Перекрытие сигналов различных источников, функционирующих в едином радиочастотном пространстве, создает вероятность интерференции и искажения передаваемой информации. В связи с этим обеспечение помехоустойчивости канала связи становится все более важной задачей. Одним из перспективных подходов к решению данной проблемы является применение технологий связи с расширением спектра, коммерческой реализацией которой является Long Range (LoRa) [1].

LoRa представляет собой формат радиомодуляции, характеризующийся высокой степенью защищенности передаваемых данных. Широко применяется в системах, требующих надежной связи в условиях значительного уровня помех. В отличие от прямой частотной модуляции FSK (Frequency Shift Keying), использование линейно-частотной модуляции (ЛЧМ) в LoRa обеспечивает значительную дальности передачи.

Также для получения стабильного канала связи необходимо верно выставить основные параметры модуляции, влияющие на качество передаваемого сигнала. Полоса пропускания Band width (BW) показывает разницу в минимальной и максимальной частоте сигнала. Коэффициент расширения Spreading Factor (SF) определяет количество бит, закодированных в один символ сигнала LoRa. Скорость кодирования Coding Rate (CR) представляет собой величину, характеризующую долю полезных данных в общем потоке передаваемой информации и определяющую параметры помехоустойчивого кодирования.

Для обеспечения помехоустойчивости LoRa использует кодирование с обнаружением и исправлением ошибок методом Forward Error Correction (FEC) [2]. Этот метод добавляет избыточные биты к данным, позволяя корректировать ошибки. Скорость кодирования выражается как $4/n$, где n принимает значения от 5 до 8, что означает, что из n переданных битов 4 содержат полезную информацию, а остальные – избыточную. Однако у способа есть недостаток, проявляющийся в увеличении времени передачи.

Цель работы заключается в исследовании влияния параметра скорости кодирования на помехоустойчивость канала связи при различных значениях коэффициента расширения. Для этого был собран экспериментальный стенд, структурная схема которого представлена на рис. 1.

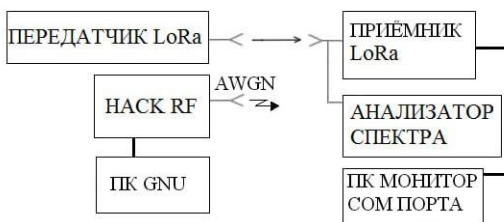


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда

Во время эксперимента отправлялось фиксированное количество идентичных сообщений. Для приёма и передачи использовались два

аппаратных модуля LoRa. В качестве помехи применялся белый гауссовский шум (AWGN), для генерации которого использовалось программно-определяемое радио (SDR) Hack RF One. Уровень SNR оценивался при помощи анализатора спектра. При приёмопередаче сигнала использовались идентичные антенны типа Мохоп с коэффициентом усиления 5,5 дБи, обеспечивающие направленный характер излучения. При измерении параметров анализатор и приёмник подключались к общей антенне через согласованный разветвитель, что позволило получить одинаковое отношение сигнала к шуму (SNR) на входе приёмника и анализатора спектра.

В рамках исследования уровень помехового сигнала постепенно увеличивался до полного подавления полезного сигнала, когда Packet Error Rate (PER = 1). Затем значение CR изменялось на следующее, и процесс повторялся [3]. Результаты измерений представлены в виде графика на рис. 2.

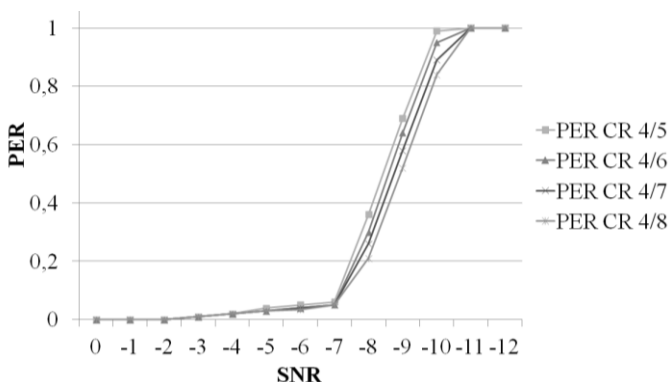


Рис. 2. Зависимость PER от CR и SNR

Во время эксперимента основные настройки имели следующие параметры: SF = 7, BW = 125 кГц, длина пакета 32 байта. При SNR = 0 дБ уровень потери пакета для CR = 4/5 и 4/8 составлял 0,0013 и 0,0004. Однако при уменьшении SNR до -9 дБ PER для тех же значений CR составлял уже 0,7077 и 0,5380 соответственно. Снижение скорости кодирования приводит к увеличению помехоустойчивости, что соответствует заявленной теории. Однако данный эффект проявляется преимущественно при умеренном уровне помех, когда отношение потерянных пакетов к полученным превышает 0,5.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FZGM-2025-0002).

ЛИТЕРАТУРА

1. Ромащенко М.А. Современное состояние задач повышения помехоустойчивости канала управления беспилотных авиационных систем на основе искусственного интеллекта / М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. – 2023. – Т. 19, № 6. – С. 142–146.
2. On the Error Rate of the LoRa Modulation with Interference / O. Afisiadis, M. Cotting, A. Burg, A. Balatsoukas // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2019. – Vol. 19, No. 2. – P. 1292–1304.
3. Guo Q. Experimental Evaluation of the Packet Reception Performance of LoRa / Q. Guo, F. Yang, J. Wei // Sensors 21. – 2021. – Vol. 21, No. 4. – P. 1071.

УДК 621.3.062.88

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

И.С. Гогадзе, аспирант каф. РТС

*Научный руководитель К.Е. Мухомор, зав. НИЛРН НИИ РТС
г. Томск, ТУСУР, ilia.s.gogadze@tusur.ru*

Коммутационные сети Клоза–Бенеша являются перспективным направлением в области систем связи, так, на их основе можно построить централизованную настройку блоков передачи данных. Используя схему построения коммутационной сети 18×18 , можно обеспечить для девятиканального ретранслятора формирующие сигналы управления и получать сигнализацию о состоянии функционирования блока, используя лишь один компонент коммутации.

Ключевые слова: сети Клоза–Бенеша, резервирование каналов передачи данных, космические аппараты, коммутационные матрицы.

Одним из направлений по повышению надёжности ретрансляторов космических аппаратов является применение коммутационных матриц (сетей), которые позволяют автоматически или в ручном режиме осуществлять коммутацию множества входных потоков с множеством выходных потоков для реализации функций коммутации линий управляющего блока и сигнализации состояния блоков формирования сигналов при сбое или прекращении работы. Одними из таких сетей являются коммутационные сети Клоза–Бенеша неблокируемого типа, при которых существует путь коммутации неиспользуемого входа с неиспользуемым выходом и которые обладают возможностью «перемаршрутизации» путей коммутации пары вход-выход [1].

Сети Клоза–Бенеша имеют топологию соединений «один к одному» для значений N кратных степени 2, состоящую из перекрёстного

соединения нескольких коммутационных элементов 2×2 . Такие переключатели позволяют под действием внешнего сигнала реализовывать прямое или перекрёстное соединение двух входов и двух выходов [2].

Управление коммутационными сетями упрощается при разбиении всей сети на подсети небольших размеров, которые используются при составлении таблиц с указанием маршрутов коммутации, как описано в работе [3], и состоит из нескольких этапов определения маршрутов коммутации:

- Определение маршрута коммутации между портами коммутационной сети.
- Составление таблиц с маршрутами между подсетями таким образом, чтобы одинаковые строки или столбцы не имели одинаковых обозначений для разных подсетей.
- Определение состояния соединения коммутационных элементов в каждом из каскадов.

Для минимизации нарушений существующих соединений при перестановке в работе [4] был представлен алгоритм, устраняющий блокировку путём составления возможных цепочек соединений и использующий для разблокировки системы самую короткую по количеству перестановок соединений.

Цель и задачи исследования. Целью статьи является составление топологии коммутационной матрицы для девятиканального ретранслятора космического аппарата с оценкой вносимых энергетических потерь при коммутации сигналов управляющего блока и блоков формирования сигналов.

Построение схемы. Коммутационные схемы предлагаются к применению в двустороннем режиме для одновременной передачи сигналов от блока управления и сигнализации о состоянии каналов связи в случае отказа или прекращения работы. Так, для 9-канальной передачи данных необходимо использование коммутационной сети размерностью 18×18 . Так как 18 не кратна степени 2, то для построения сети произвольного размера необходимо использовать коммутационные элементы 3×3 .

Построения сетей Бенеша с нечётным количеством элементов (AS-Benes) описаны в работах [2, 5], данные сети произвольного размера позволяют снизить количество необходимых коммутационных элементов с сохранением производительности, при котором элементы 3×3 подключаются посредством соединения первых $n-1$ входов к $\lfloor n/2 \rfloor$ коммутаторам и каждый коммутатор подключается к верхней и нижней части сети. Таким образом, полученная сеть для девятиканальной передающей системы имеет вид, как показано на рис. 1.

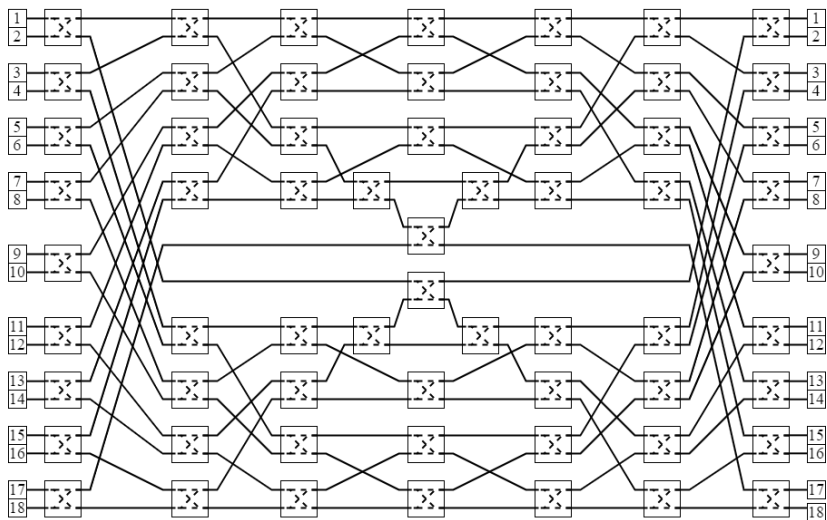


Рис. 1. Оптимизированная коммутационная матрица AS-Бенеша 18×18

В работе [6] экспериментально показано, что вносимые потери для этапа «прямого» соединения составляют 1,3 дБ, для этапа «перекрёстного» соединения – 1,5 дБ, а потери при пересечении волноводов – 0,11 дБ. Учитывая, что количество коммутационных элементов, используемых при коммутации двух портов, равняется $(2 \cdot \log_2 N) - 1$, то суммарные потери для девятиканальной передающей системы для самого протяжённого пути будут составлять 12,92 дБ, а для самого короткого пути – 9,1 дБ без учёта потерь в микрополосковых линиях.

Заключение. Полученные теоретические расчёты потерь также согласуются с экспериментальными данными реальных устройств, представленных в работах [6–9]. Таким образом, предложенный вариант повышения надёжности ретрансляторов космических аппаратов позволяет обеспечить формирование сигналов управления и получать сигнализацию о состоянии функционирования блока, используя лишь одну коммутационную сеть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веселовский Г.Г. Коммутационные сети в многопроцессорных вычислительных системах с общим управлением (анализ современного состояния) / Г.Г. Веселовский, М.Ф. Каравай, С.М. Кузнецик // Автомат. и телемех. – 1989. – Вып. 2. – С. 3–29.
2. Chang C., Melhem R. Arbitrary size benes networks // Parallel Processing Letters. – 1997. – Vol. 7, No. 03. – P. 279–284.
3. Zulfin M. et al. The Implementation of Routing Division Algorithm on the 16×16 Benes Switching Network // 2020 4rd International Conference on

Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM). – IEEE, 2020. – P. 162–165.

4. Ohta S. A new result on rearrangeable 3-stage Clos networks // 2018 28th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). – IEEE, 2018. – P. 1–6.

5. Jumandi Z. Optimized arbitrary size networks / Z. Jumandi, A. Samsudin, R. Budiarto // Proceedings. 2004 International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, 2004. – IEEE, 2004. – P. 665–666.

6. Qiao L. 32×32 silicon electro-optic switch with built-in monitors and balanced-status units / L. Qiao, W. Tang, T. Chu // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7, No. 1. – P. 42306.

7. Diaferia F. et al. Compact 12×12 Switch Matrix integrating RF MEMS switches in LTCC hermetic packages // 2014 44th European Microwave Conference. – IEEE, 2014. – P. 199–202.

8. Lu L. et al. 16×16 non-blocking silicon optical switch based on electro-optic Mach-Zehnder interferometers // Optics express. – 2016. – Vol. 24, No. 9. – P. 9295–9307.

9. Wonfor A. et al. Large port count high-speed optical switch fabric for use within datacenters // Journal of Optical Communications and Networking. – 2011. – Vol. 3, No. 8. – P. A32–A39.

УДК 621.372

ПРИМЕНЕНИЕ КВАЗИПЛАНАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХСВЯЗНОЙ ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИИ В НЕОТРАЖАЮЩИХ ПОЛОСНО-ПРОПУСКАЮЩИХ ФИЛЬТРАХ

Е.А. Григоренко, студент каф. РСС;

Т.А. Чепко, аспирант каф. КУДР

*Научный руководитель Н.Д. Малютин, проф. каф. КУДР, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, ndm@main.tusur.ru*

Рассматривается неотражающий полосно-пропускающий фильтр, представленный в виде направленного ответвителя на связанных полосковых линиях с нагрузками в виде RLC-цепей, включенных в его диагональные плечи. Приведено сравнение частотных характеристик неотражающих фильтров с направленным ответвителем на связанных линиях с двумя ортогонально расположенными подложками и на трехсвязных полосковых линиях. Описывается оптимизированная топология направленного ответвителя, снижающая технологические требования для производства.

Ключевые слова: направленный ответвитель, трехсвязные линии, связанные линии, неотражающий фильтр, RLC-цепи, неравные нагрузки.

Цель данной работы заключается в решении задачи упрощения технологии производства неотражающих полосно-пропускающих фильтров (НППФ) на связанных полосковых линиях (СПЛ). Эквивалентная схема НППФ показана на рис. 1. Эта упрощенная схема включает связанные полосковые линии I и II, диагональные плечи которых нагружены буферными резонансными нагрузками (БРН) в виде RLC-цепей с импедансами z_2 и z_3 [1–3]. Ранее применялась конструкция связанных линий типа VIP с двумя ортогонально расположенными подложками с разной диэлектрической проницаемостью [4]. Связанные полоски наносятся на обе подложки и для их соединения применяется пайка, что усложняет монтаж подложек и, соответственно, связанных полосок. Кроме этого, увеличиваются потери по причине наличия паяного шва.

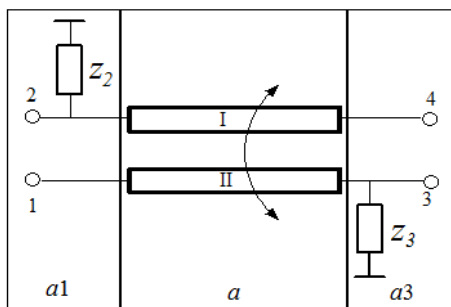


Рис. 1. Эквивалентная схема неотражающего фильтра на двухсвязных полосковых линиях, нагруженных на сопротивления z_2 и z_3

С целью упрощения конструкции ранее применявшихся VIP связанных линий с вертикальной вставкой предложено использовать трехсвязные полосковые линии. Такие конструкции применяются в основном для обеспечения сильной электромагнитной связи, например, для проектирования фазовращателей [5, 6] и трансформаторов [5] или для сохранения частотно-селективных свойств модальных фильтров при удалении сигнальных проводников друг от друга [7]. В работе [8] предлагается использовать трехсвязные полосковые линии в печатных платах для повышения физической защиты, исключающей опасность одновременного повреждения резервируемого и резервного сигнальных проводников. В патенте [9] приведен направленный ответвитель (НО) с разделенной на три части третьей связанной полоской, что повышает технологичность регулирования электрических параметров устройства.

Поперечное сечение конструкции трехсвязной полосковой линии показано на рис. 2, а. Связанные полоски с шириной w_1 , выполненные на подложке толщиной h_1 , перекрыты третьей полоской шириной w_2 ,

отделенной от токонесущих полосок тонким слоем диэлектрика толщиной $h2$. Поэтому показанная конструкция названа квази-планарной в отличие от VIP СПЛ, которая отнесена к 3D-типу [4]. Эквивалентная схема неотражающих фильтров на основе трехсвязной полосковой линии представлена на рис. 2, б.

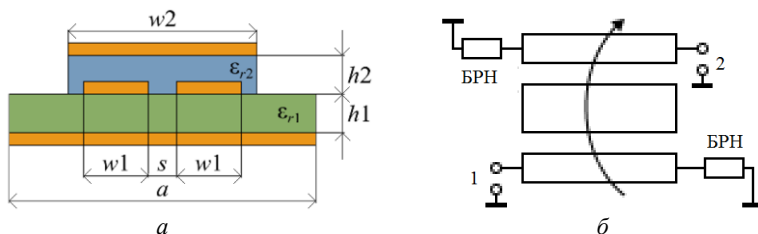


Рис. 2. Поперечное сечение конструкции трехсвязной линии (а) и эквивалентная схема неотражающих фильтров на основе трехсвязных полосковых линий (б)

Отрезок трехсвязной СПЛ, примененный в настоящей работе, имел топологические особенности, сопоставимые с применявшейся ранее СПЛ типа VIP: $w1 = 0,6$ мм; $w2 = 2$ мм; $s = 0,1$ мм; $h1 = 1,5$ мм; $h2 = 0,2$ мм; $\epsilon_{r1} = 4,5$; $\epsilon_{r2} = 3$; длина участка связанных линий составила 28,5 мм.

Для корректного сравнения получаемых частотных параметров фильтров на разных типах СПЛ они рассчитывались с одинаковой топологией БРН, имевшей размер $5,5 \times 2$ мм² [10]. Номиналы RLC-цепей: $R = 50$ Ом; $L = 23$ нГн; $C = 1,2$ пФ. Рассчитанные зависимости коэффициентов передачи и отражения приведены на рис. 3 и 4, их сравнение приведено в таблице.

Из сравнения частотных характеристик неотражающих фильтров двух типов можно сделать вывод о сопоставимости их параметров в диапазоне частот до 6 ГГц. Наблюдаются особенности в полосе пропускания, которые объясняются различием волновых процессов в связанных линиях. Безусловно, третья полоска в структуре трехпроводных линий участвует в формировании волновых процессов и при моделировании рассматривается как проводник, работающий в режиме холостого хода. Более глубокое исследование особенностей распространения волн трех типов в конструкции и схеме, показанной на рис. 2, даст ответ о возможности улучшения параметров.

Тем не менее представленный вариант исполнения неотражающего фильтра проще в изготовлении при сопоставимых параметрах с прототипом.

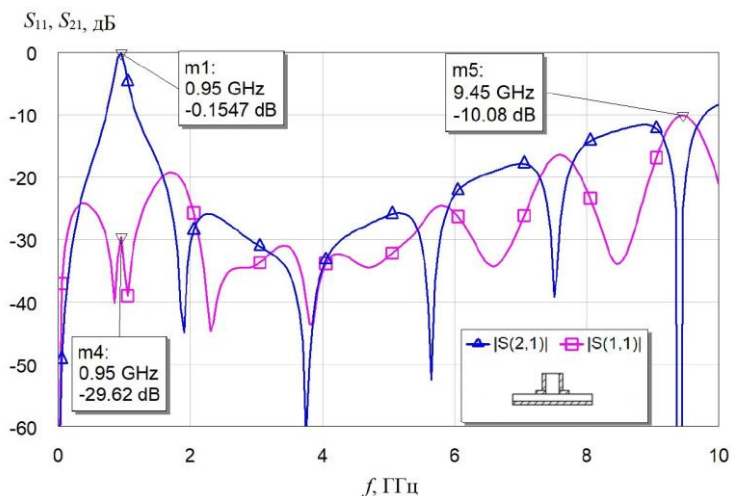


Рис. 3. Частотные зависимости НППФ на основе связанных линий типа VIP

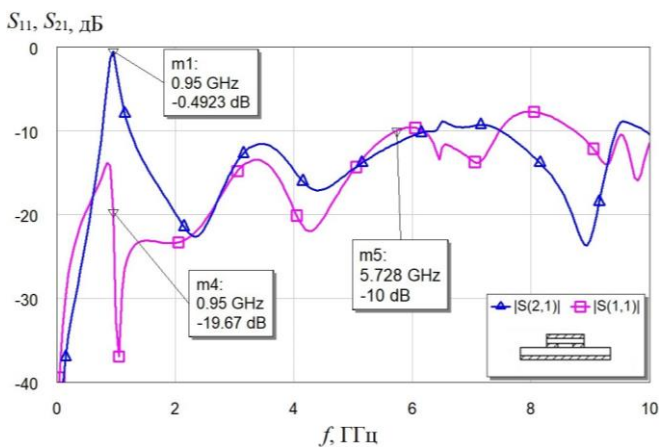
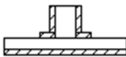


Рис. 4. Частотные зависимости НППФ на основе трехсвязных полосковых линий

Сравнение частотных параметров фильтров на разных НО

Параметр для сравнения		
f_0 , ГГц	0,95	0,95
Δf , МГц	161,3	160,1
$S_{21}(f_0)$, дБ	-0,15	-0,49
$S_{11}(f_0)$, дБ	-29,62	-19,67
$f(S_{11} = -10 \text{ дБ})$, ГГц	Не достигает в диапазоне до 8 ГГц	5,73

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2023-0014 от 16.01.23.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент № 2819096 РФ. Полосковый неотражающий полосно-пропускающий перестраиваемый фильтр: № 2023123738: заявл. 14.09.2023, опубл. 14.05.2024 / Лощилов А.Г. (RU), Чинь Т.Т. (VN), Малютин Г.А. (RU).
2. Патент № 2820780 РФ. Малогабаритный неотражающий полосно-пропускающий фильтр. Чинь Т.Т. (VN), Малютин Н.Д. (RU). № 2024103313, 10.02.2024, опубл. 10.06.2024.
3. Патент № 2820791 Р.Ф. Неотражающий полосно-пропускающий фильтр нечетных гармоник / Чинь Т.Т. (VN), Малютин Н.Д. (RU) № 2024103312, 10.02.2024, опубл. 10 июня 2024.
4. Малютин Н.Д., Чинь Т.Т. 3D-конструкции связанных линий и их применение в СВЧ-устройствах // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.5.8>
5. Split striplines with adjustable parameters and devices based on them / N. Malyutin, A. Malyutina, G. Malyutin, A. Zabolotsky // ITM Web of Conferences. 29th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2019) / Ed. P. Yermolov. – 2019. – P. 06015.
6. Phase shifters based on split strip lines / N.D. Malutin, A.G. Loschilov, I.V. Bolshanin, A.N. Malutina // 2012 22nd International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology». – 10–14 September 2012. – P. 516–517.
7. Иванцов И.А. Модальное разложение помехи в связанной микрополосковой линии при удалении сигнальных проводников друг от друга // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 3. – С. 124–133. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-124-133.
8. Способ удаленной трассировки печатных проводников цепей с однократным модальным резервированием: пат. 2801688 РФ / Т.Р. Газизов, И.А. Иванцов; заявл. 06.12.2022, опубл. 14.08.2023.
9. Микрополосковое направленное устройство: пат. 2364996 РФ. № 2007149202/09 / А.В. Быков, О.В. Кустов, Е.В. Крупин; заявл. 29.12.2007; опубл. 20.08.2009.
10. Чепко Т.А. Влияние топологии буферных резонансных нагрузок на частотные характеристики неотражающих полосно-пропускающих фильтров // Доклады (матер. конф.) тридцатой междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» («СибРесурс-30–2024»). – Томск: ТУСУР, 2024. – С. 161–167.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОТРАЖАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ НА КВАЗИПЛАНАРНЫХ СВЯЗАННЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЯХ

А.А. Толстов, студент каф. РСС;

Г.А. Малютин, аспирант каф. КУДР

Научный руководитель Н.Д. Малютин, проф. каф. КУДР, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, ndm@main.tusur.ru

Рассматриваются связанные полосковые линии с сильной электромагнитной связью благодаря наличию дополнительной металлизированной диэлектрической подложке, установленной над связанными линиями. На основе данной конструкции моделируется неотражающий полосно-пропускающий фильтр и исследуются его частотные характеристики при изменении толщины верхней диэлектрической подложки и зазора между связанными линиями. При неизменных диэлектрических проницаемостях подложек, значение которых составило $\epsilon_r = 4,5$, было определено, что при толщине верхнего диэлектрика 0,2 мм и зазоре 0,3 мм достигаются наилучшие характеристики неотражающего фильтра.

Ключевые слова: связанные полосковые линии, неотражающий фильтр, оптимизация.

Ранее в работах [1, 2] был исследован неотражающий фильтр на основе 3D-конструкции связанных линий передачи, называемой также связанными полосковыми линиями с вертикальной подложкой (на англ. vertical install plane coupled striplines). Несмотря на достижение удовлетворительных результатов в моделировании и экспериментальных исследованиях, остро стоял вопрос о технологичности исследуемого устройства. Одной из первостепенных задач в целях улучшения разработанных неотражающих фильтров стала задача по поиску иной геометрии связанных полосковых линий, объединяющих в себе следующие качества: высокие и в то же время близкие коэффициенты емкостной и индуктивной связи, близкие коэффициенты распространения в широком частотном диапазоне; отношение фазовых скоростей синфазных и противofазных волн, близкое к единице.

Поиски такой конструкции привели к решению разместить сверху над горизонтальными связанными линиями дополнительную металлизированную с одной стороны диэлектрическую подложку (рис. 1). Это позволяет увеличить электромагнитную связь между планарными проводниками. На рис. 2 представлена эквивалентная схема неотражающего полосно-пропускающего фильтра, включающего в себя исследуемую полосковую конструкцию с подключенными буферными резонансными нагрузками (БРН) в виде RLC-цепей. Так-

же в эквивалентной схеме учитываются подводящие полосковые линии (ПЛ1–ПЛ4). Нумерация полосковых линий на рис. 1 и 2 одинакова: 1 и 2 – планарные связанные линии; 3 – металлизированная сторона на верхней диэлектрической подложки.

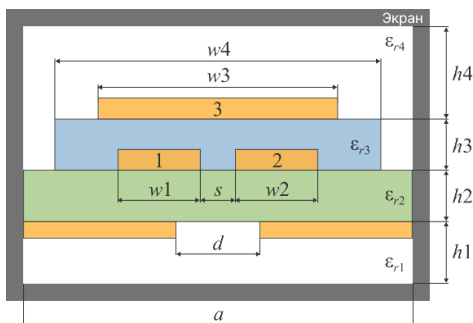


Рис. 1. Поперечное сечение исследуемых связанных линий в экране

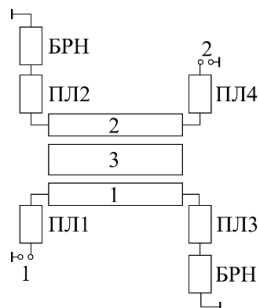


Рис. 2. Эквивалентная схема неотражающего фильтра

Численным конечно-разностным методом сеток и при использовании алгоритмов, рассмотренных в работе [3], исследовались различные друг от друга варианты поперечного сечения связанных полосковых линий (см. рис. 1). Изменяемыми параметрами были толщина верхней диэлектрической подложки $h3 = 0,2...1,5$ мм и зазор между связанными линиями $s = 0,05...0,5$ мм. В качестве постоянных параметров были: ширина экрана и нижней диэлектрической подложки $a = 10$ мм; высота нижней подложки $h2 = 1,5$ мм; ширина связанных линий $w1 = w2 = 0,8$ мм; относительные диэлектрические проницаемости первой и второй подложки $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 4,5$; расстояние до экрана $h1 = h4 = 5$ мм; диэлектрическое заполнение между экраном и полосковой структурой $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r4} = 1,0$. Зазор в заземляемом основании отсутствовал, $d = 0,0$ мм. Длина связанных линий была 22,5 мм. При этом ширина верхней подложки и площадь ее металлизации всегда корректировались таким образом, чтобы полностью покрывать связанные линии, т.е. $w3 = w4 = w1 + w2 + s$.

Длина ПЛ1–ПЛ4 (см. рис. 2) была равна 9,8 мм. БРН были одинаковы в диагональных плечах и настроены на частоту 2 ГГц со следующими номинальными значениями сосредоточенных элементов: $R = 50$ Ом; $L = 6,8$ нГн; $C = 1$ пФ.

В результате был исследован ряд из 20 различных вариантов неотражающего фильтра и найдено лучшее соотношение размеров $h3$ к s , при которых достигается минимальный коэффициент отражения S_{11}

в широком диапазоне частот и максимальное подавление вторичных полос пропускания полосно-пропускающего фильтра. На рис. 3 представлены варианты частотных характеристик фильтра.

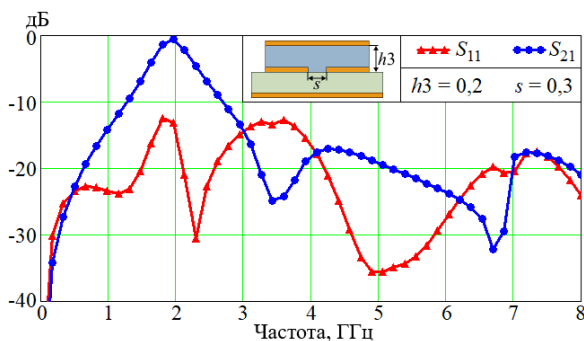
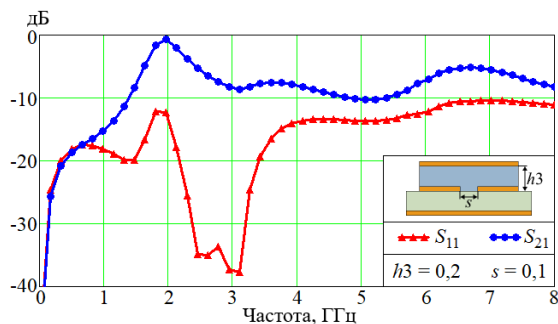
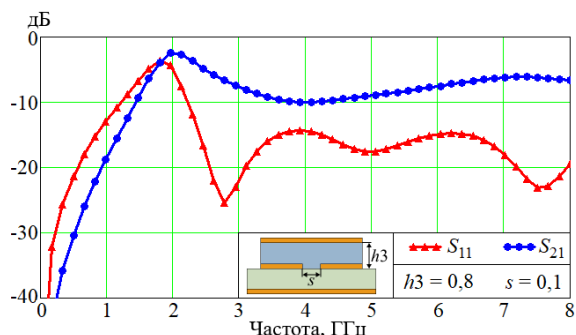


Рис. 3. Частотные характеристики неотражающего фильтра при размерах квазипланарных связанных линий

Для $h3 = 0,8$ мм и $s = 0,1$ мм характеристики представлены на рис. 3, *а*. Видно, что на центральной частоте S_{11} практически достигает значения коэффициента передачи. На рис. 3, *б* наблюдается улучшение характеристик при уменьшении $h3$ до 0,2 мм. Коэффициент отражения во всей рассматриваемой полосе частот не превышает -10 дБ. Наилучшие частотные зависимости неотражающего полосно-пропускающего фильтра были получены при размерах $h3 = 0,2$ мм и $s = 0,3$ мм, что показано на рис. 3, *в*.

Причина, по которой при увеличении толщины верхней подложки нарушаются частотно-селективные свойства фильтра, заключается в уменьшении электромагнитной связи между планарными связанными линиями. Резонаторы в виде RLC-цепей впоследствии полностью определяют центральную частоту фильтра [4], однако амплитудные значения коэффициентов отражения и пропускания, главным образом, определяются степенью связи направленного ответвителя на связанных линиях. Увеличение толщины верхней диэлектрической подложки возможно компенсировать иными параметрами, например, увеличением диэлектрической проницаемости, которая в настоящей работе оставалась неизменной, так как особый интерес представляла достижимость требуемых параметров при одинаковых $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 4,5$.

Таким образом, путем численных экспериментов были определены геометрические размеры поперечного сечения квазипланарных связанных полосковых линий, при которых достигаются лучшие частотные характеристики неотражающего полосно-пропускающего фильтра. При $h3 = 0,2$ мм и $s = 0,3$ мм коэффициент отражения S_{11} во всей полосе частот не превышает минус 14 дБ, коэффициент передачи S_{21} на центральной частоте равен минус 0,336 дБ.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта № FEWM-2023-0014 от 16.01.23.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полосно-пропускающий фильтр СВЧ неотражающего типа на основе распределенно-сосредоточенной цепи / А.Г. Лощилов, Т.Т. Чинь, Т.А. Чепко, Г.А. Мalyutin // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. – 2023. – № 5. – С. 89–90.
2. Синтез связанных полосковых линий с гетерогенным диэлектрическим заполнением / А.Г. Лощилов, Т.Т. Чинь, Н.Д. Мalyutin, Г.А. Мalyutin // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 1. – С. 7–16. DOI: 10.21293/1818-0442-2021-25-1-7-16.
3. Malyutin G.A. Algorithms and programs for analysis and synthesis devices based on distributed and lumped circuits / G.A. Malyutin, T.T. Trinh // International

4. Малютин Г.А. Особенности взаимодействия резонаторов на сосредоточенных элементах и отрезках связанных полосковых линий, образующих неотражающие фильтры / Г.А. Малютин, Т.А. Чепко, Е.В. Санников // Доклады (матер. конф.) Тридцатой Междунар. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» («СибРесурс-30–2024»).

УДК 621.396

ВЛИЯНИЕ ОШИБОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОТРАЖАТЕЛЕЙ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ДО ИРИ ОДНОПОЗИЦИОННОЙ ПАССИВНОЙ СИСТЕМЫ

Г.И. Ляхов, аспирант каф. РТС

*Научный руководитель А.А. Мещеряков, доцент каф. РТС, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, geryahov@gmail.com*

Анализируются ошибки определения дальности до источника радиоизлучения (ИРИ) пассивной однопозиционной системой определения координат. Приводятся результаты расчета погрешности в определении дальности до ИРИ по заданным пеленгам и задержке отраженных сигналов от местных предметов при их различном расположении на трассе распространения радиоволн.

Ключевые слова: пеленг, дальность, источник радиоизлучения, отраженный сигнал, временное положение.

Однопозиционный метод определения координат ИРИ разработан в НИИ РТС ТУСУР и подробно описан в монографии [1]. Для определения координат ИРИ измеряют пеленг на источник сигнала и пеленги на отражатели, от которых поступает достаточно сильный сигнал относительно прямого. Факторами, влияющими на точность системы, являются точность определения пеленга на отражатели и точность определения времени задержки отраженных сигналов относительно прямого.

Расчет теоретических погрешностей производился следующим образом. Было построено несколько эллипсов (рис. 1), соответствующих различным задержкам отраженных сигналов при заданном расстоянии между ИРИ и приемником (ПР). При этом малые полуоси эллипсов соответствовали величинам 5, 10, 20, 50% от расстояния между фокусами, т.е. расстояниям между ИРИ и ПР. На каждом эллипсе были выбраны области, в которых обозначены точками расположения отражателей, что соответствовало разным участкам трассы распространения радиоволн.

Предварительно по известным размерам эллипсов, расстоянию между его фокусами и положению отражателей на трассе были вычислены эталонные пеленги отражателей и времена задержки между прямым и отраженными сигналами. После чего производился расчет расстояния от ИРИ до ПР, при условии введения ошибок в измеряемые параметры пеленга и времени задержки в пределах ± 2 и ± 200 нс соответственно.

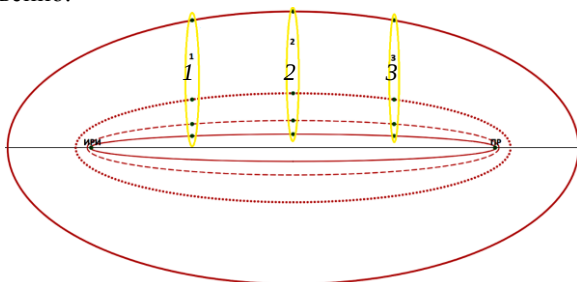


Рис. 1. К пояснению производимых расчетов

В результате расчета были получены зависимости, приведенные на рис. 2.

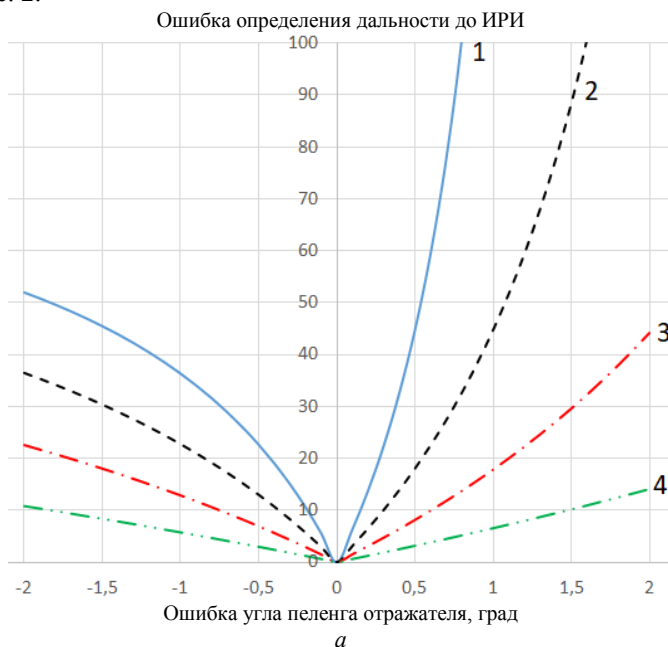


Рис. 2 (начало)

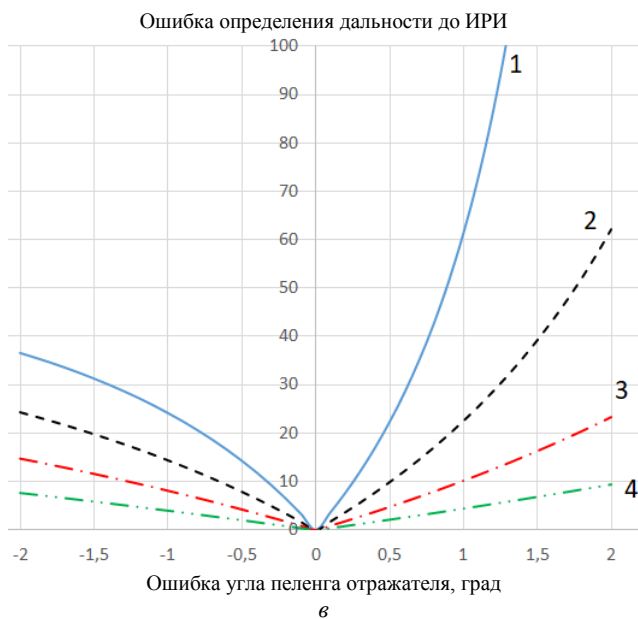
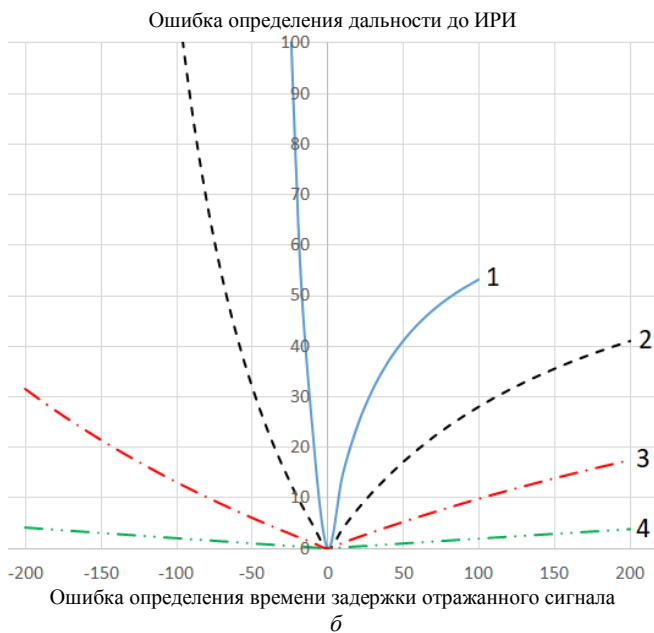


Рис. 2 (продолжение)

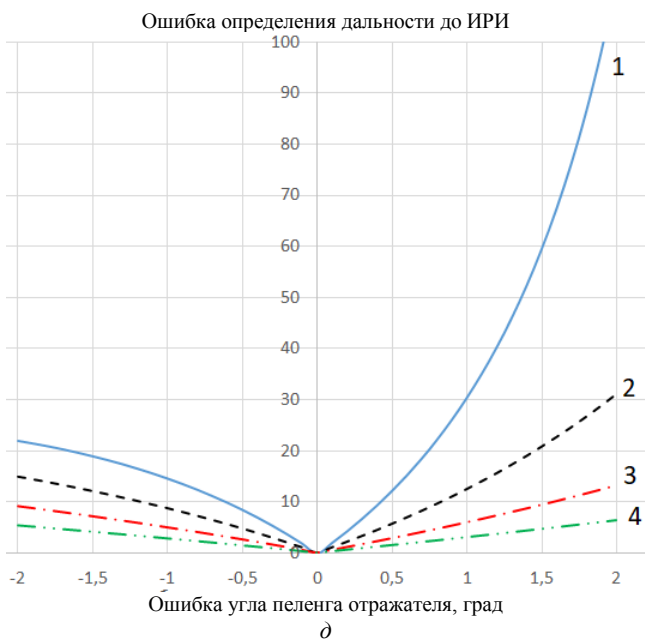
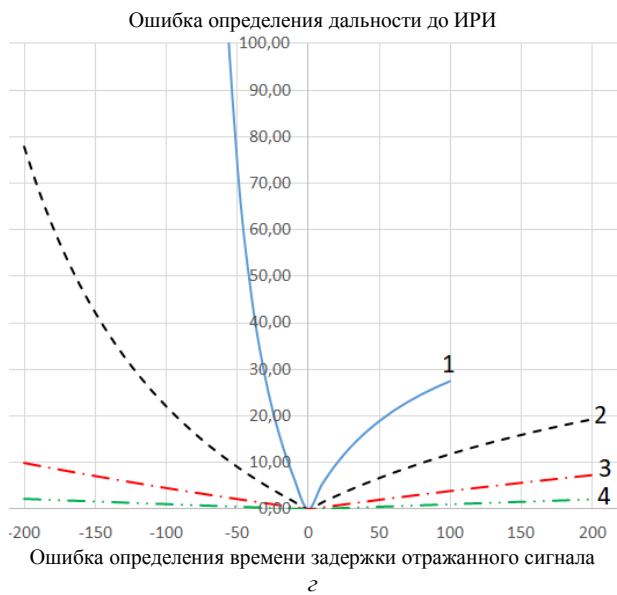


Рис. 2 (продолжение)

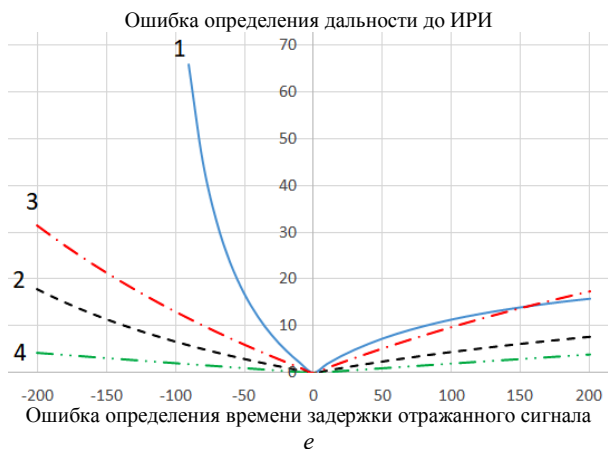


Рис. 2 (окончание). Зависимости ошибки определения дальности до ИРИ: a, b — для области 1; $в, г$ — для области 2; $д, е$ — для области 3 от: $a, в, д$ — ошибки измерения пеленгов; $b, г, е$ — ошибки измерения разности времени прихода для отражателей

На рис. 2 приведены зависимости ошибки определения дальности до ИРИ от ошибки измерения пеленгов на отражатели и от ошибки определения времени задержки между сигналами для области 1 (см. рис. 1).

На рис. 2, a, b зависимости, обозначенные линиями 1–4, соответствуют ошибкам, связанным с неточностью определения положения отражателей на эллипсах от меньшего к большему соответственно.

На рис. 2, $в, г$ и $д, е$ приведены аналогичные зависимости для расположения отражателей в области 2 и 3 (см. рис. 1) на трассе распространения радиоволн соответственно.

Из приведенных зависимостей можно сделать следующие выводы:

- точность измерения дальности до ИРИ в большей степени зависит от точности измерения пеленга, чем от измерения задержки;
- с увеличением расстояния между отражателем и линией визирования ошибка расчета дальности до ИРИ уменьшается;
- при увеличении расстояния между источником сигнала и отражателем ошибка определения дальности уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пространственно-временные искажения сантиметровых радиосигналов на наземных трассах распространения и их влияние на точность пассивных систем местоопределения / В.П. Денисов, Г.С. Шарыгин, М.В. Крутиков, В.Ю. Лебедев, А.А. Мещеряков, Д.В. Дубинин и др.; под общ. ред. В.П. Денисова. – Томск: ТУСУР, 2014. – 502 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 629.78:621.311.6

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ СИНТЕЗА МОДУЛЯ ЗАРЯДНОГО УСТРОЙСТВА КОМПЛЕКСА АВТОМАТИКИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В АСПЕКТЕ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

А.И. Боярчук, преп. каф. КИПР,

инженер-конструктор АО «НПЦ «Полюс»

*Научный руководитель Н.Н. Кривин, зав. каф. КИПР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. КИПР, Liocha-97@mail.ru*

Внедрение цифровых двойников (ЦД) в жизненный цикл космической электроники, соответствующее стратегическим целям РФ до 2030 г., направлено на оптимизацию проектирования, производства, испытаний и эксплуатации изделий, сокращая затраты и повышая надёжность. На примере модуля зарядного устройства космического аппарата (МЗУ КАС КА) демонстрируется применение связки SolidWorks и Matlab для создания ЦД, обеспечивающего мультифизическое моделирование.

Ключевые слова: цифровой двойник изделия, модуль зарядного устройства комплекса автоматики и стабилизации космического аппарата, SolidWorks, MatLab.

В рамках реализации Указов Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 года» и от 21.07.2020 г. № 474 «О национальных целях развития РФ на период до 2030 года» изучение и внедрение концепции цифровых двойников (ЦД) в разные стадии жизненного цикла космической электроники от проектирования и производства изделия до его испытаний и эксплуатации является одним из приоритетных направлений в отечественной экономике.

Особенности цифровых двойников позволяют на стадии НИР частично автоматизировать процессы инженерии требований, а следова-

тельно, обеспечить выполнение ключевых требований к требованиям (непротиворечивости, прослеживаемости и проверяемости), на стадии проектирования изделия – добиться значительной экономии материальных ресурсов, из которых это изделие будет сделано, и понизить его себестоимость, на стадии производства – добиться существенного сокращения времени изготовления изделия и повысить гибкость производственной системы, на стадии испытаний – достичь существенной экономии финансовых, материальных и временных ресурсов за счет проведения множественных параллельных виртуальных испытаний на виртуальных полигонах в ускоренном машинном времени в разных испытательных условиях и режимах, на стадии эксплуатации – в разы повысить долговечность и время наработки на отказ изделий за счет использования методов предиктивной аналитики в управлении режимами эксплуатации этих изделий [1]. Подход к разработке изделий с использованием концепции ЦД получил название цифровой инженерии [2]. Данные характеристики ЦД весьма актуальны для космической техники в связи с особыми условиями её эксплуатации.

Таким образом, актуальной является проблема разработки ЦД бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов. Из-за значительной роли ЦД в вопросах современной цифровой инженерии необходимо рассмотреть содержание основных понятий предметной области вопроса.

Цифровая модель изделия – система математических, компьютерных моделей и электронных документов, описывающая структуру, функции и поведение изделия на всех этапах жизненного цикла [3]. Цифровой двойник (ЦД) включает эту модель и двусторонние информационные связи с изделием и его компонентами. Для эффективности ЦД требуются высокая адекватность моделей (свыше 95%) и корректная интеграция разнопредметных моделей (электромагнетизм, механика, тепломассообмен и др.) через принципы мультифизического моделирования, обеспечивающие их согласованное взаимодействие.

В качестве объекта исследования был выбран МЗУ КАС КА, так как одной из самых важных систем в современных КА являются СЭП КА: выход СЭП ведет к отказу всего аппарата в целом.

Главной функцией МЗУ является стабилизация поступающего с солнечных батарей (БС) напряжения для последующей зарядки аккумуляторных батарей (АБ), для этого он либо понижает, либо повышает зарядное напряжение в зависимости от орбиты, на которой используется.

Для разработки выбраны САПР SolidWorks (создание конструктивной модели) и Matlab (расчёты электромагнитной совместимости и тепловых полей после импорта модели).

Создание цифрового двойника МЗУ КАС КА сократит сроки разработки образцов, снизит затраты, ускорит адаптацию под ТЗ и вывод изделия на рынок, а также повысит надёжность космического аппарата за счёт моделирования поведения в разных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровков А.И. Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии. – М.: Сколково, 2017. – 86 с.
2. Прохоров А.Н. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А.Н. Прохоров, М.Н. Лысачев, А.И. Боровков. – М.: АльянсПринт. – 2020. – 401 с.
3. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. – Введ. 2021-09-16. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 15 с.

УДК 681.5

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ НА ТОЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОСАДКИ

Е.К. Гончарова, А.А. Горелов, студенты;

А.В. Картуков, ст. преп. каф. 410 МАИ

*Научный руководитель В.В. Егоров, ст. преп. каф. 408 МАИ
г. Москва, МАИ, skb-4@bk.ru*

Проведены испытания опытного образца автоматической оптической малоканальной системы посадки в идеальных и эксплуатационных условиях. На их основе была произведена оценка точности системы посадки при влиянии внешних факторов.

Ключевые слова: оптическая система посадки, беспилотное воздушное судно, помеха, погрешность.

В настоящее время активно обсуждается возможность полета нескольких беспилотных и пилотируемых воздушных судов в общем воздушном пространстве. Планируется рост использования беспилотных воздушных судов (БВС) для логистики в черте города, что требует особой точности определения координат вследствие ограниченных пространств для маневра. Широко используемые системы навигации не способны обеспечить достаточной точности. Следовательно, появляется необходимость в разработке нового устройства, удовлетворяющего задачам современной беспилотной авиации.

В СКБ-4 была предложена концепция автоматической оптической малоканальной системы посадки (АОМС), принцип работы которой основан на методе триангуляции. Он заключается в построении треугольников в пространстве (при помощи сигналов бортового опти-

ческого передатчика и четырех наземных оптических приемников), рассчитав стороны и углы которых, можно определить местоположение БВС и его высоту.

Свет от бортового оптического передатчика проходит через собирающую линзу и образует световое пятно диаметром d на квадратной площадке длиной a (рис. 1). Площадка разделена на четыре сектора, в каждом из которых находится фотодиод. Световое пятно перемещается по площадке симметрично перемещению передатчика. На каждом секторе выделяется разное напряжение, пропорциональное площади пересечения светового пятна и фотодиода. Зная отношения этих напряжений, можно определить координаты центра светового пятна и, следовательно, координаты бортового оптического передатчика.

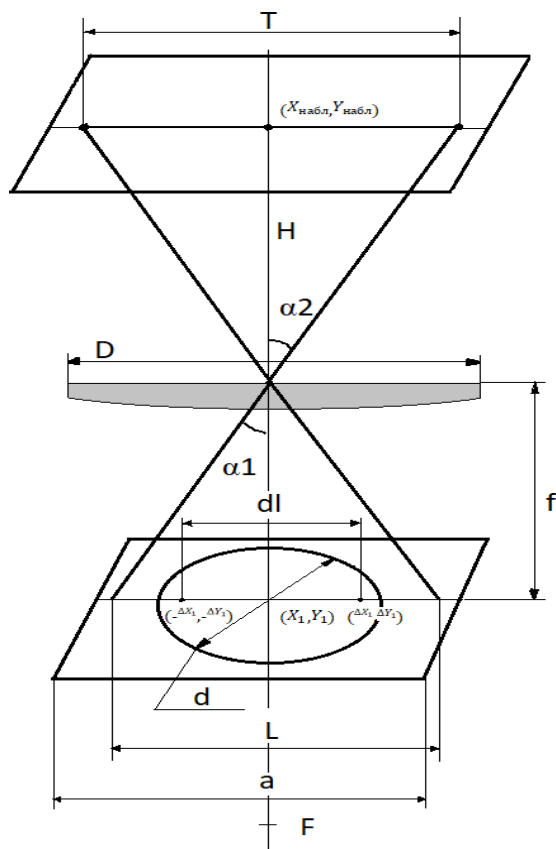


Рис. 1. Формирование светового пятна на площадке приемника

Координаты, получаемые при помощи глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), имеют погрешность 2 м. АОМС корректирует данные ГНСС и позволяет осуществить вертикальный заход на ограниченную площадку в автоматическом режиме. Оптическая система также имеет погрешность в определении координат, но является более точной навигационной системой. Для успешной посадки БВС заказчиками было выдвинуто требование в допустимой погрешности определения координат 2,5 см.

В идеальных условиях погрешность определения координат обусловлена наличием собственных шумов операционных усилителей и сложности расчета углов. Такие погрешности можно свести к минимуму путем калибровки приемника и выбора оптимальной базы (расстояния между приемниками) системы посадки. В реальных условиях погрешность определения координат БПЛА обусловлена факторами внешнего воздействия. При попадании на поверхность линзы сторонних предметов световое пятно может изменять свою форму, интенсивность излучения. Из-за этого изменяется площадь пересечения пятна с фотодиодом, следовательно, и выходная амплитуда. Координаты определяются с ошибкой, которые нельзя исправить математически вследствие их непредсказуемости.

Для исследования возникновения погрешностей АОМС в эксплуатационных условиях использовались корпус приемника, линза и белый лист бумаги, на котором формировалось световое пятно, излучаемое лампой. Помехи создавались намеренно, при этом при помощи фотокамеры фиксировалось формируемое световое пятно. Изображение светового пятна в идеальных условиях показано на рис. 2.



Рис. 2. Изображение светового пятна в идеальных условиях

Сторонние источники света при попадании на оптический приемник также формируют световое пятно (рис. 3). Происходит засветка, из-за которой определить координаты становится невозможно. Избирательность системы реализуется путем фильтрации полезного сигнала, который излучается с частотой 32,768 кГц.



Рис. 3. Засветка сторонним источником

В случае тумана и дождя на линзе формируются капли, в которых свет переотражается и формируются помеховые световые пятна. Они накладываются на истинное пятно, возникает интерференция (см. рис. 4), и координаты определяются с ошибкой. Также подобная погрешность появляется из-за бликов, отражения света от других поверхностей.

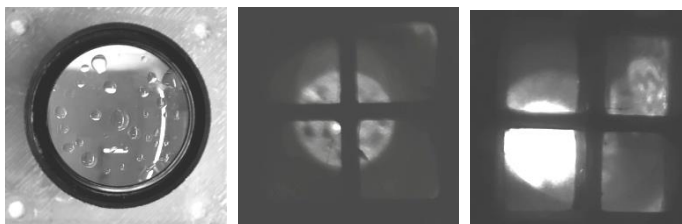


Рис. 4. Световое пятно при попадании капель воды на линзу

Дым, пыль и загрязнение линзы – препятствуют формированию пятна на площадке фотодиодов, вследствие этого ослабляется выходной сигнал приемника (рис. 5).

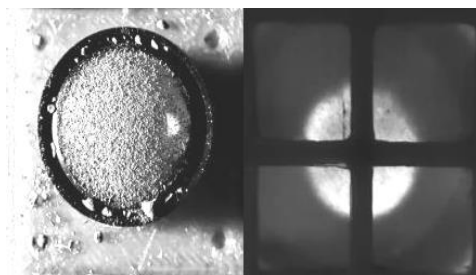


Рис. 5. Световое пятно при загрязненной линзе

Сильное загрязнение линзы приводит к появлению выраженных минимумов внутри светового пятна (рис. 6). Из-за этого амплитуда сектора определяется неверно, следовательно, и координаты БВС.

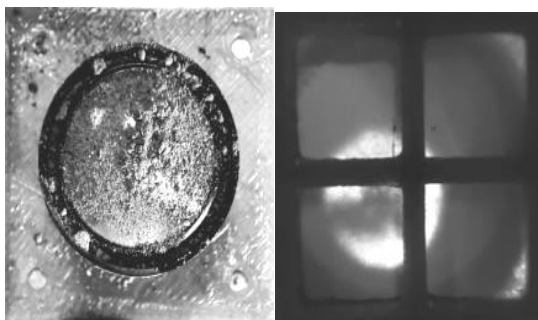


Рис. 6. Световое пятно при сильном загрязнении линзы

Исследование формирования статического светового пятна в эксплуатационных условиях показало, что в случае незначительного загрязнения, тумана, дыма происходит ослабление амплитуды входного сигнала и ошибка координат получается незначительной. Чем ниже БВС, тем ярче формируемое на приемниках пятно и меньше погрешность измерения координат. Следовательно, мощность передатчика нужно подобрать такую, чтобы при стандартной высоте захода на посадку АОМС могла работать с минимальной погрешностью. В условиях дождя, тумана (выпадение росы), сильного загрязнения линзы определение координат значительно усложняется из-за деформации формы пятна и появления выраженных минимумов. Для устранения этого недостатка можно использовать струйный поток воздуха, сдувающий посторонние предметы с линзы. В дальнейшем планируется исследовать погрешность определения координат динамического пятна в различных условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончарова Е.К. Разработка конструкции и облика оптической системы автоматической посадки БПЛА на площадку малого размера / Е.К. Гончарова, В.В. Егоров // Сб. науч. тр. XVI Междунар. молодежной науч.-техн. конф. «Молодежь. Техника. Космос». – СПб.: Изд-во Балтийского гос. техн. ун-та «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2024. – Т. 2. – С. 214–218.
2. Гончарова Е.К. Метод повышения избирательности малоканального оптического приемника / Е.К. Гончарова, В.В. Егоров // Сб. науч. тр. междунар. молодежной науч.-техн. конф. «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – Севастополь: Изд-во РНТОРЭС им. А.С. Попова, СевГУ, 2024. – С. 129.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПАЙПЛАЙНА ИМПОРТА 3D-МОДЕЛЕЙ В UNREAL ENGINE С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PYTHON И BLENDER API

А.П. Сваровский, М.А. Сафонова, студенты каф. КИПР;

В.В. Грахович, студент каф. КСУП

г. Томск, ТУСУР, svarovskiyalex2016@mail.ru

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

г. Томск, ТУСУР, nikolai.n.krivin@tusur.ru

Проект ГПО КИПР-2301. Промышленный дизайн радиоэлектронной аппаратуры на игровом движке Unreal Engine 5

Рассматривается автоматизация импорта 3D-моделей в Unreal Engine с использованием Python-скриптов в Blender и Unreal Engine. Описаны проблемы ручного переноса моделей, предложены методы автоматизации.

Ключевые слова: пайплайн, 3D-модели, Unreal Engine, Blender, Python, Blender API, Unreal Python API, импорт, экспорт.

В современных проектах, связанных с разработкой игр, VR и архитектурной визуализацией, автоматизация рабочих процессов становится важной задачей. Одной из ключевых областей является автоматизация импорта 3D-моделей в Unreal Engine. Использование Python-скриптов в Blender и Unreal Engine позволяет сократить время на рутинные задачи, уменьшить вероятность ошибок и стандартизировать процесс переноса контента.

Процесс переноса моделей вручную включает несколько этапов:

- подготовка моделей в Blender (нормализация, настройка материалов, UV-развертка);
- экспорт файлов в нужном формате;
- импорт моделей в Unreal Engine;
- настройка материалов, анимации и параметров сцены.

Таким образом, проблема заключается в том, что процесс может быть длительным и подверженным ошибкам, особенно при работе с большим количеством моделей.

Целью настоящей работы является разработка автоматизированного пайплайна, который минимизирует участие человека в импорте 3D-моделей, обеспечивая надежный и быстрый перенос данных из Blender в Unreal Engine с помощью Python и Blender API.

Для достижения данной цели используются Python API Blender для автоматизации экспорта моделей и Unreal Python API для загрузки моделей в движок и настройки материалов, а также проводится срав-

нительный анализ производительности различных подходов к автоматизации.

Для того чтобы начать писать код, необходимо настроить Blender и Unreal Engine.

В Blender переходим в меню Edit->Preferences и в разделе Interface включаем Python Tooltips и Developer Extras. После проделанных действий в меню навигации появится пункт Scripting.

В Unreal Engine открываем меню Plugins в Edit, через поисковую строку ищем плагин Python Editor Script Plugin и устанавливаем его. Дополнительно можно установить среды разработки (IDE), на примере PyCharm или Visual Studio Code.

После первоначальной настройки программ можно приступить к написанию кода.

Перед тем как экспортировать модель и импортировать её в Unreal Engine, необходимо её привести к стандартным параметрам: нормализовать масштаб, расположение и ориентацию. Это важно, потому что в противном случае после импорта в Unreal Engine модель может оказаться слишком большой, маленькой или расположенной неправильно. Для этого в Blender API надо выбрать объект, проверить, является ли он типом MESH, вернуть его на начальные координаты, т.е. $(x,y,z) = (0,0,0)$, сбросить его размер до $(1,1,1)$ и при помощи функции `ops.object.transform_apply()` из библиотеки `bpy` [1] применить все трансформации.

Для корректного отображения текстур в Unreal Engine необходимо заранее настроить UV-развёртку. Для этого во время редактирования модели нужно расставить швы, после этого в Blender API создать объект типа `bmesh`, передать всю геометрию от `mesh`-объекта и проверить, имел ли объект `uv`-развёртку или нет. Для реализации этой проверки можно использовать функцию `loops.layers.uv.verify()` [1], и если объект не имел `uv`-развёртки, то она создаст новую. Далее необходимо применить данную развёртку и обратно конвертировать объект в тип `mesh`.

После подготовки модели её необходимо экспортировать в формате, который поддерживается Unreal Engine. Чаще всего используются FBX (данный формат используется для передачи 3D-ресурсов между различными приложениями или конвейерами, такими как анимация, разработка игр и рендеринг). Это действие можно выполнить при помощи функции `bpy.ops.export_scene.fbx()` [1], дополнительно указав, что `embed_textures` [1] и `bake_space_transform` [1] будут иметь значение `True`, поскольку первая функция встраивает текстуры в FBX-файл, а вторая исправляет несоответствие осей, чтобы модель импортировалась правильно.

Экспортировав модель в нужном формате, можно приступить к написанию кода импорта модели в Unreal Engine. Для этого можно написать функцию, принимающую имя файла и его местоположение. В самой функции будет создаваться задача через функцию `AssetImportTask()` [2, 3]. В создаваемую задачу можно задать дополнительные параметры, такие как `task.replace_existing`, `task.automated`, `task.save` и т.. После, благодаря функции `AssetToolsHelpers.get_asset_tools().import_asset_tasks([task])` [2, 3], модель будет импортироваться в Unreal Engine с заданными параметрами.

На данный момент, если запустить полученные скрипты, модель будет находиться в разделе Content Drawer в Unreal Engine, и на ней отображаются текстуры. Данные скрипты можно найти на Github, введя в поисковике выражение: «Scripts for Blender API and Unreal Python API» [5].

Также было проведено сравнение между полученными скриптами и официальным плагином для Unreal Engine – Send to Unreal [4]. По скорости переноса модели и функционалу код проигрывает официальному плагину, поскольку необходимо время для запуска скриптов и выбора модели, когда плагин напрямую импортирует модели в Unreal Engine и имеет больший функционал. Но по сравнению с ручным вводом скрипты сокращают время экспорта и импорта модели в 2 раза и значительно сокращают вероятность ошибок.

Разработка автоматизированного пайплайна на основе Python и Blender API упрощает и ускоряет процесс переноса моделей в Unreal Engine. Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию с системами контроля версий и облачными сервисами для управления 3D-контентом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Документация Blender 4.3 по Python API [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.blender.org/api/current/index.html>, свободный (дата обращения: 01.03.2025).
2. Документация Unreal Python API [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/python-api/index?application_version=5.4, свободный (дата обращения: 05.03.2025).
3. UE4 – Python – Импорт ресурсов. Компьютерный журнал Одея Маоза Эрелла [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://odederell3d.blog/2019/04/09/ue4-python-importing-assets/>, свободный (дата обращения: 05.03.2025).
4. Экспорт в UE5 из Blender с помощью аддона Send to Unreal [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://noostyche.ru/blog/2022/12/31/eksport-v-ue5-iz-blender-s-pomoshchyu-addona-send-to-unreal/>, свободный (дата обращения: 10.03.2025).
5. Ссылка на Github с итоговыми кодами и инструкцией по использованию [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/LexusXR/Scripts-for-Blender-API-and-Unreal-Python-API/tree/main>, свободный (дата обращения: 10.03.2025).

ИНТЕГРАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИ КОРРЕКТНЫХ МАТЕРИАЛОВ (PBR) ИЗ BLENDER В UNREAL ENGINE

М.А. Сафонова, А.П. Сваровский, студенты каф. КИПР;

В.В. Грахович, студент каф. КСУП

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

Проект ГПО КИПР-2301. Промышленный дизайн радиоэлектронной аппаратуры на игровом движке Unreal Engine 5

г. Томск, ТУСУР, masha.safonova.2005@gmail.com

Рассматриваются способы оптимизации процесса интеграции PBR-материалов из Blender в Unreal Engine, представлены практические рекомендации по преодолению проблем, связанных с различиями в рендеринге и текстурировании. Предложены решения для оптимизации и автоматизации интеграции.

Ключевые слова: Blender, Unreal Engine, PBR, материалы, интеграция, glTF, текстуры, нормали, автоматизация, импорт, экспорт.

Физически корректные материалы (PBR) являются стандартом в современной 3D-графике, обеспечивая реалистичное освещение и взаимодействие материалов с окружающей средой. Однако перенос PBR-материалов из Blender в Unreal Engine сопряжен с рядом сложностей, включая различия в рендеринговых движках, конвертацию текстур и настройку шейдеров.

Важнейшие факторы, затрудняющие передачу PBR-материалов из Blender в Unreal Engine, делятся на:

- различия в системах освещения и рендеринга;
- конвертацию текстурных карт между движками;
- корректную передачу параметров материала, таких как металличность, шероховатость и нормали;
- автоматизацию процесса экспорта и импорта материалов.

На основании вышеизложенного проблема заключается в сложности достижения визуальной идентичности материалов между Blender и Unreal Engine, что требует ручной корректировки и приводит к возникновению возможных ошибок.

Целью данной работы является исследование и анализ проблем интеграции PBR-материалов из Blender в Unreal Engine, разработка решений и рекомендаций для минимизации потерь качества и времени при импорте.

Для реализации цели применяются методы тестирования экспорта материалов в различных форматах, таких как FBX, glTF, USD, проводится анализ различий между материалами Blender – BSDF Shader и

Unreal Engine – Material Editor, используются автоматизированные скрипты для упрощения переноса PBR-материалов и ставятся эксперименты с настройкой текстур и шейдеров.

Одной из главных проблем интеграции материалов является различие в системах рендеринга Blender и Unreal Engine. Blender использует шейдер Principled BSDF, тогда как в Unreal Engine для создания компонента применяется Material Editor, что приводит к необходимости ручного переноса параметров. В рамках этой задачи нужно для начала, подготовить PBR-текстуры в Blender – они генерируются через такие характеристики, как Base Color, Roughness, Metallic, Normal и Ambient Occlusion. Каждая текстура сохраняется в формате, поддерживаемом Unreal Engine [1, 2].

После импорта модели разрабатывается новый материал в Content Browser, а PBR-текстуры перетаскиваются в Material Editor, где для каждой создается нод Texture Sample. Для соответствующих выходов нодов Texture Sample присоединяются входы нода материала. Созданный материал перемещается из Content Browser на модель в окне Viewport в целях применения полученных изменений.

При появлении трудностей с конвертацией текстур, вызванных разными направлениями осей OpenGL и DirectX, можно использовать ноды Flip Green Channel в Unreal Engine или корректировку нормалей в Blender перед экспортом.

В Unreal Engine для быстрой коррекции нод «FlipGreenChannel», находящийся в Material Editor, подключается к текстуре нормалей, тогда как выход нода присоединяется ко входу нода «Normal» материала.

В Blender с целью корректировки нормалей перед экспортом инвертируется зеленый канал текстуры Normal Map, использующий ноды Separate RGB, Invert и Combine RGB. Итоговый результат подключается обратно к ноду Normal Map.

Ключевым фактором, влияющим на успешный перенос параметров материала, является выбор формата файлов или использование сторонних инструментов для экспорта и импорта между Blender и Unreal Engine.

Выбирая формат glTF, разработанный специально для передачи 3D-сцен и материалов, для начала устанавливается и активируется аддон для экспорта. Перед импортом в Unreal Engine аддон настраивается: формат выбирается из .glb или .gltf, включаются опции «Export Materials», «Apply Modifiers», «Normals», «UVs» и «Tangents». Только после всех настроек производится импорт в Unreal Engine [3].

В качестве альтернативного варианта используются сторонние инструменты, такие как Substance Painter. Процесс работы начинается с экспорта модели из Blender в приложение в формате FBX, далее

настраиваются параметры материала и текстур с пресетом, предназначенным для Unreal Engine. В завершение происходит импорт материала в Unreal Engine [4].

По результатам тестирования использование формата glTF значительно оптимизирует передачу материалов из Blender в Unreal Engine, упрощая первоначальную настройку. Скрипты позволяют автоматизировать процесс и исправить несоответствие нормалей между OpenGL в Blender и DirectX в Unreal Engine на этапе экспорта, что уменьшает количество ошибок.

Интеграция PBR-материалов между Blender и Unreal Engine требует учета различий в рендеринге и текстуровании. Автоматизация процесса и выбор правильных методов экспорта позволяют минимизировать потери качества и ускорить работу. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку плагинов для автоматизированного переноса материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Документация Blender 4.3 по FBX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.blender.org/manual/en/latest/addons/import_export/scene_fbx.html, свободный (дата обращения: 10.03.2025).
2. Документация Unreal Engine Texture Import [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/texture-import-settings-in-the-unreal-engine-project-settings>, свободный (дата обращения: 15.03.2025).
3. Экспорт в UE5 из Blender с помощью аддона glTF [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.blender.org/manual/en/latest/addons/import_export/scene_glTF2.html, свободный (дата обращения: 12.03.2025).
4. Документация Substance Painter in Blender [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://helpx.adobe.com/substance-3d-integrations/3d-applications/blender/substance-in-blender-overview.html>, свободный (дата обращения: 05.03.2025).

УДК 004.942

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ 3D-МОДЕЛИ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ДЛЯ 3D-МОДЕЛЬЕРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИГРОВЫХ ДВИЖКОВ

Н.С. Хайбулин, М.И. Хацкевич, студенты каф. КСУП и КИПР

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

г. Томск, ТУСУР, max77_max77@mail.ru

Проект ГПО КИПР-2301. Промышленный дизайн радиоэлектронной аппаратуры на игровом движке Unreal Engine 5

Представлен подход к созданию легковесного приложения на базе технологий Unreal Engine для интерактивной визуализации

3D-моделей с возможностью импорта различных форматов (FBX, OBJ) и поддержкой PBR-материалов. Проведен анализ существующих плагинов импорта/экспорта моделей с акцентом на минимизацию операций для быстрого отображения. Работа сосредоточена на реализации визуализации, аналогичной игровым движкам, что решает проблему отличия отображения в 3D-редакторах от финального результата в игровых приложениях.

Ключевые слова: визуализация 3D, игровой движок, рендеринг в реальном времени, Unreal Engine, 3D-модели, PBR-материалы, интерактивное управление, импорт, экспорт.

Современное 3D-моделирование применяется в индустрии развлечений, разработке игр и промышленном дизайне. Традиционные программы (3ds Max, Blender, Maya) с их встроенными средствами рендеринга или сторонними платными плагинами (Arnold, V-Ray, Redshift) требуют значительных вычислительных ресурсов и времени. Игровые движки позволяют быстро и качественно визуализировать модели, сокращая время итераций разработки. Однако модельеры часто не готовы устанавливать полноценные игровые движки объемом 25–150 Гб лишь для проверки качества моделей перед передачей на следующий этап производства.

Цель работы – создание специализированного приложения на базе Unreal Engine для 3D-модельеров, обеспечивающего просмотр и оценку моделей в реальном времени. Основной фокус – в простоте импорта моделей и текстур, гибком взаимодействии и применении PBR-материалов. Игровые движки (Unreal Engine, Unity) изначально созданы для вывода сложной графики в реальном времени. Их методы оптимизации (LOD/Nanite, шейдеры, динамическое освещение) позволяют отображать качественные 3D-модели без длительной постобработки. Unreal Engine выделяется богатым инструментарием, визуальным скриптингом Blueprint и обширной библиотекой плагинов.

Для создания приложения на Unreal Engine выбран плагин для импорта-экспорта 3D-моделей, обеспечивающий загрузку форматов FBX, OBJ и текстур (PNG, TIFF, JPEG, JPG, TGA, BMP) во время работы приложения. После рассмотрения доступных на маркетплейсе вариантов (RuntimeLoadFbx [1], ImportExportModels [2] и Real Time Import/Export Plugin [3]) выбран Real Time Import/Export Plugin благодаря стабильной поддержке различных форматов и простоте интеграции в проект.

Архитектура приложения и ключевые функции разрабатываются на Unreal Engine с использованием визуального языка Blueprint. Реализованы следующие основные возможности:

- Загрузка 3D-модели: пользователь выбирает файл FBX или OBJ для быстрого просмотра в рабочей области.

- Загрузка текстур: через интерфейс плагина подключаются файлы форматов PNG, TIFF и т.д. Материалы автоматически обновляются в реальном времени.

- Управление моделью: панорамирование, приближение и удаление модели (zoom), повороты под любым углом, перемещение по сцене. Для пользователя сохранена классическая схема управления камерой, как в стандартном Unreal-проекте.

- Стандартный PBR-материал: модель отображается с расчётом освещения, отражений и свойств материалов в реальном времени.

- Лёгкая система конфигурации: за счёт упрощённого интерфейса и отключения тяжёлых функций UE (например, объёмных эффектов) потребление ресурсов снижается, что упрощает просмотр сцен даже на средних по характеристикам компьютерах.

Особенности реализации. Подключение Real Time Import/Export Plugin и настройка Blueprint-графов для импорта осуществляются через вызов соответствующих узлов (Blueprint nodes), позволяющих указать путь к файлу. При успешной загрузке плагин создаёт в памяти временные объекты, которые отображаются в игровом уровне (уровень – основное пространство сцены в Unreal Engine).

Для интерактивного управления камерой в проекте используются стандартные классы PlayerController и Pawn. При этом можно переопределить основные методы управления (MoveForward, MoveRight, Turn, LookUp), оставляя ощущения, аналогичные тем, к которым привыкли 3D-художники в среде Unreal Engine.

Преимущества предлагаемого решения:

- Сокращение времени итерации при редактировании модели благодаря рендерингу в реальном времени.

- Удобная загрузка и обновление материалов без необходимости перезапуска приложения.

- Поддержка PBR-шейдеров с высокой степенью фотореалистичности.

- Возможность переработки приложения под конкретные нужды 3D-модельеров благодаря системе Blueprint.

Таким образом, визуализация 3D-моделей в реальном времени с использованием игровых движков значительно ускоряет рабочий процесс 3D-модельеров. Разработанное на Unreal Engine приложение с Real Time Import/Export Plugin позволяет оперативно просматривать изменения в моделях и материалах, приближаясь к итоговому качеству уже на этапе разработки. В будущем возможно добавление дополнительных функций (процедурные шейдеры, библиотека готовых материалов, использование своих мастер-материалов, настройка Post-Processing, HDR-карты, система взаимодействия с виртуальной или

дополненной реальностью), что ещё больше повысит удобство и скорость работы 3D-модельеров.

Работа выполнена в рамках инициативного проекта (тема проекта «Разработка приложения для рендеринга 3D-моделей в реальном времени»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Плагин RuntimeLoadFbx [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fab.com/listings/45a1688a-ccd5-4aee-9e5e-d3a265876fee> (дата обращения: 17.03.2025).

2. Плагин ImportExportModels [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fab.com/listings/275e32b1-a1e3-44f5-b343-28ef811420e2> (дата обращения: 17.03.2025).

3. Плагин Real Time Import/Export Plugin [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fab.com/listings/60321fa8-c82f-436d-a372-4035207f7eb9> (дата обращения: 17.03.2025).

4. Документация Unreal Engine 5.5 Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/unreal-engine-5-5-documentation> (дата обращения: 17.03.2025).

УДК 629.7.054.07

НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГРУППОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А.В. Лыхо, аспирант; И.В. Тяпкин, доцент каф. СРС

Научный руководитель Д.Д. Дмитриев, проф. каф. СРС, д.т.н.

г. Красноярск, СФУ, alykho@sfu-kras.ru

Рассмотрены перспективы развития беспилотных авиационных систем. Раскрыты особенности их навигационного обеспечения для группового применения. Рассмотрены относительные методы измерения навигационных параметров при помощи ГНСС-приемников. Предложен новый метод измерения взаимных координат, минимизирующий требования к вычислительным ресурсам и каналам связи, основанный на использовании ГНСС-приемниками единого созвездия навигационных космических аппаратов при решении навигационной задачи и расчете взаимных координат.

Ключевые слова: спутниковая радионавигация, ГЛОНАСС, беспилотные авиационные системы, организация группового применения беспилотных воздушных средств, относительные навигационные измерения.

В настоящее время наблюдается бурное развитие беспилотных авиационных систем (БАС), которые применяются во многих областях хозяйственной и оборонной деятельности развитых стран мира:

картографирование местности, мониторинг стихийных бедствий, проведение поисково-спасательных работ, доставка грузов, контроль протяженных объектов – нефтегазопроводов, ЛЭП, железных дорог [1]. Кроме того, наблюдается тенденция применения БАС в составе организованных групп, что позволяет существенно повысить их эффективность – осуществлять одновременный мониторинг и картографирование больших территорий, распределять цели и задачи между членами группы [2]. Одной из основных проблем группового применения БАС является обеспечение траекторной безопасности из-за возможного пересечения траекторий движения и столкновения БАС на всех этапах функционирования группы, а также поддержки строя группы при выполнении целевых задач и перестроениях [3].

Учитывая достаточно жесткие требования к бортовым навигационным средствам БАС по массе, габаритам и энергопотреблению, применение ГНСС-приемников является практически безальтернативным для позиционирования БАС всех классов [4], но стандартные методы спутниковой навигации не обеспечивают требуемой точности позиционирования членов группы между собой – типовая погрешность измерения координат в ГЛОНАСС и GPS составляет единицы метров.

Во многих сценариях группового применения БАС наиболее важным параметром является погрешность взаимной навигации членов группы между собой, от величины которой зависит и тактика их применения – плотность построения группы, степень автономности членов группы, возможность совместного целевого использования и т.п. Причем основную роль имеет не абсолютная погрешность измерения координат, а точность взаимной привязки отдельных объектов в группе между собой. В этом случае возможно применение относительных методов измерения навигационных параметров в ГНСС-приемниках, позволяющих снизить долю внешних составляющих в общем бюджете погрешностей – тропосферной, ионосферной, эфемеридной погрешностей, общих и практически одинаковых для близко расположенных ГНСС-приемников [5]. В данном случае измерение абсолютных координат объектов осуществляется со стандартной точностью, а между собой они привязываются с гораздо меньшей погрешностью – до единиц сантиметров [6, 7]. Основными преимуществами методов взаимной навигации является отсутствие контрольно-корректирующих станций и необходимости в организации каналов связи с сетью Интернет.

Можно выделить два основных метода относительных измерений, основанных на кодовых и фазовых измерениях, каждый из кото-

рых имеет свои достоинства и недостатки [8]. Одним из их основных недостатков является необходимость организации каналов связи внутри группы для передачи измеренных кодовых или фазовых псевдодалностей. Для его устранения предлагается новый метод измерения взаимных координат, минимизирующий требования к вычислительным ресурсам и каналам связи.

В отличие от известных дифференциальных и относительных методов измерения координат в ГНСС-приемниках, основанных на коррекции измеренных псевдодалностей, предлагаемый метод основан на использовании ГНСС-приемниками при решении навигационной задачи и расчете взаимных координат единого созвездия навигационных космических аппаратов. Учитывая, что внешние составляющие погрешности для ГНСС-приемников будут одинаковы, такой способ позволит улучшить точность измерения взаимных координат при резком снижении требований к вычислительным ресурсам и каналу связи – в составе передаваемых данных достаточно передать состав используемого созвездия и координаты ГНСС-приемника, измеренные в автономном режиме. При этом возможны три варианта измерения взаимных координат – определение координат всех членов группы относительно лидера; разбиение группы на подгруппы и определение координат членов подгруппы относительно ее лидера, а лидеров подгрупп – относительно друг друга; определение координат всех членов группы относительно друг друга по принципу «каждый с каждым».

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 25-19-20070.

ЛИТЕРАТУРА

1. UAV assistance paradigm: State-of-the-art in applications and challenges / B. Alzahrani, O. Sami Oubbati, A. Barnawi, M. Atiquzzaman, D. Alghazzawi // *Journal of Network and Computer Applications*. – 2020. – Vol. 166.
2. Селин А.И. Обзор целевых объектов применения беспилотных летательных аппаратов, работающих в составе группы / А.И. Селин, И.К. Туркин // *Научный вестник Моск. гос. техн. ун-та гражданской авиации*. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 91–105.
3. Титков И.П. Координированное управление формацией группы БПЛА с обеспечением траекторной безопасности в виде желаемых положений на пространственных траекториях / И.П. Титков, А.А. Карпунин // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. – 2022. – Т. 20, № 4. – С. 25–35.
4. Multi-UAV Collaborative Absolute Vision Positioning and Navigation: A Survey and Discussion / P. Tong, X. Yang, Y. Yang, W. Liu, P. Wu // *Drones*. – 2023. – Vol. 7.

5. Методы взаимной высокоточной навигации, основанные на использовании относительных режимов работы угломерных приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем / Д.Д. Дмитриев, В.Н. Тяпкин, Ю.Л. Фатеев и др. // Космические аппараты и технологии. – 2022. – Т. 6, № 2 (40). – С. 123–132.

6. Шарфунова Т.Г. Точность измерения навигационных параметров в навигационной аппаратуре потребителя спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС, оснащенной антенной решеткой / Т.Г. Шарфунова, В.Н. Тяпкин, Д.Д. Дмитриев // Радиотехника. – 2013. – № 6. – С. 22–25.

7. The phase ambiguity resolution in the angle-measuring navigation equipment / Yu.L. Fateev, D.D. Dmitriev, V.N. Tyapkin, E.N. Garin, V.V. Shaidurov // AIP Conference Proceedings. – 2014. – P. 12–14.

8. Study of Methods of Mutual High-Precision Navigation Based on the Use of Goniometric GNSS Receivers / D.D. Dmitriev, A.B. Gladyshev, V.N. Ratushnyak et al. // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT): Proceedings, Moscow, 09–11.06.2022. – M.: Moscow Institute of Electronics and Mathematics, 2022.

УДК 621.396.67

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФАЗИРОВАННЫХ РАВНОМЕРНЫХ КРУГОВЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ РАДИОЛУЧЕЙ С НЕНУЛЕВЫМ ОРБИТАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ

К.А. Нгуен, аспирант каф. КИПР

*Научный руководитель Н.Н. Кривин, зав. каф. КИПР, доцент, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, nikolai.n.krivin@tusur.ru, kuang.nguen@tusur.ru*

В последнее время быстро растёт число исследований электромагнитных волн с ненулевым орбитальным угловым моментом (НОУМ) из-за их многообещающего использования в прикладных задачах радиотехники, в частности для повышения информационной способности радаров и для решения проблемы перегрузки радиодиапазона. К основным вопросам, рассматриваемым в этой новой области исследований, относятся способы генерации НОУМ-радиолучей. Среди наиболее часто используемых способов генерации – фазированная равномерная круговая антенная решетка (ФРКАР). Основная задача работы – аналитический обзор существующих решений ФРКАР, генерирующих радиоволны с НОУМ. **Ключевые слова:** фазированная равномерная круговая антенная решетка, ненулевой орбитальный угловой момент, НОУМ-радиолокация.

ФРКАР состоит из N элементов, равномерно распределенных по окружности (рис. 1).

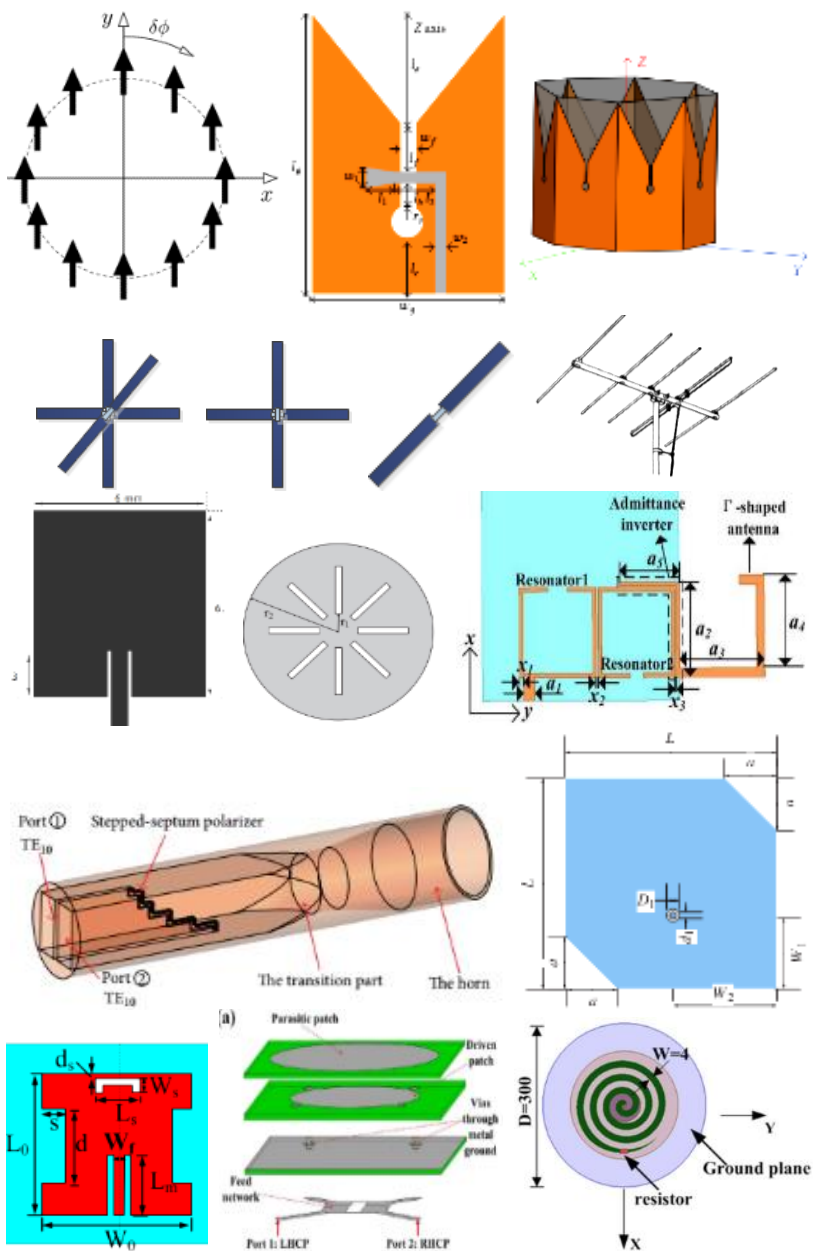


Рис. 1. Примеры существующих конструкций ФРКАР

Каждый элемент решетки управляется входным сигналом одинаковой амплитуды, но разной фазы, а разность фаз между соседними элементами решетки составляет $\Delta\varphi = 2\pi l/N$, где l – мода ОУМ, так что разность фаз по всей решетке составляет $2\pi l$. Теоретически РКАР с N элементами решетки может создавать вихревую волну без искажений с $|l| < N/2$ [1].

Диполь – самый простой элемент ФРКАР [1]. При его замене различными видами антенн получаются разные ФРКАР (см. рис. 1). Диполь не излучает ОУМ-пучок. Для этого нужен кроссдиполь. При использовании триполя можно не только изменять направление поляризации, но и ориентацию оси пучка, регулируя амплитуду и относительную фазу возбуждения [2]. Последовательным соединением элементов антенны Вивальди и складыванием их в полый цилиндр формируется круговая антенная решетка Вивальди [3].

Рупорная антенна применена для обеспечения НОУМ со всеми тремя поляризациями: линейной, левой круговой и правой круговой [5], это позволяет значительно увеличить пропускную способность беспроводной связи и спектральную эффективность. Щелевая антенная решетка имеет простую конструкцию, и её легко изготовить [6]. Антенны Яги–Уда могут направлять сигналы в одну сторону, уменьшая помехи и улучшая приём, поэтому ФРКАР из антенн Яги–Уда [8] подходит для применения ОУМ для связи в дальней зоне.

Использование микрополосковых (МП) ФРКАР имеет преимущества по сравнению с остальными типами ФРКАР благодаря низкому профилю, гибкой конструкции и простоте внедрения. Элементы МП ФРКАР могут использоваться в разных формах: прямоугольных [4], двухэлементных круговых [10], круговых поляризованных угловых режущих патч-антеннах [9], патч-антеннах Н-образной формы [12], идентичных одноплечевых спиральных антеннах [11], трехполосных фильтрующих антеннах [13].

Каждый элемент ФРКАР может питаться непрямым отдельным фазовращателем (рис. 2), тогда состояниями ОУМ-мод генерируемых лучей можно управлять по разным параметрам, однако это дает сложность применения антенных систем и большую затрату материалов, поэтому такая система питания применяется только для экспериментальных установок.

Сортировщиком мод вводятся подходящие фазовые сдвиги как в передающую, так и в приемную антенные решетки с целью кодирования/декодирования до $N-1$ ОУМ-мод в случае N -элементных ФРКАР [8]. Связывая 8-элементную кольцевую антенную решетку с матрицей Батлера 8×8 , можно одновременно и независимо генерировать волны, переносящие 8 различных ОАМ, и, таким образом, мультиплексиро-

вать сигналы на той же частоте и поляризации [15]. МП-питающие сети применяются для питания патч-антенн. На рис. 2 приведены разные типы этих питающих сетей, в том числе комбинация фазовращателя и делителя мощности [7], дифференциально-фазовая питающая сеть [4, 12, 13], линза Ротмана [14], компактный полусосредоточенный 2-диапазонный гибридный 90° ответвитель [10], однородный делитель [11].

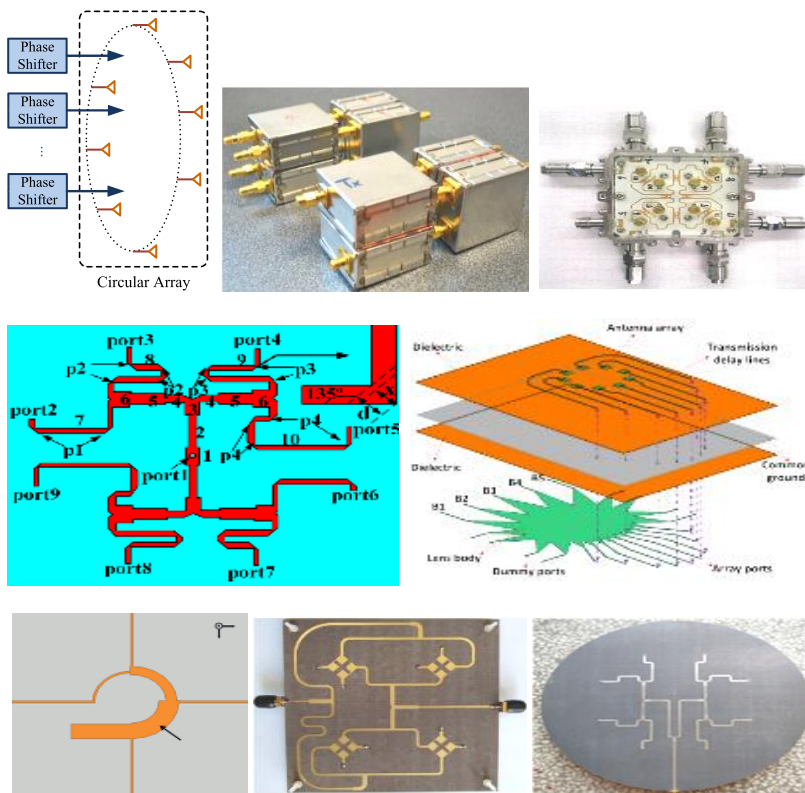


Рис. 2. Схемы запитки элементов ФКРАР

Таким образом, с помощью разных конструкций ФРКАР можно гибко контролировать моды радиоволн, генерировать мультиплексированный ОУМ-радиолуч, управлять поляризационными состояниями генерируемых НОУМ-радиолучей. Поэтому ФРКАР имеет большой потенциал в применении ОУМ для будущих систем радиосвязи и радиолокации.

ЛІТЕРАТУРА

1. Orbital angular momentum in radio—a system study / M. Mohammadi, et al. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58, No. 2. – P. 565–572.
2. UCA-based orbital angular momentum radio beam generation and reception under different array configurations / H. Wu et al. // Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). – 2014.
3. Generation of OAM radio waves using circular Vivaldi antenna array / C. Deng et al. // International Journal of Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 2013, No. 2.
4. Experimental circular phased array for generating OAM radio beams / Q. Bai et al. // Electronics Letters. – 2014. – Vol. 50, No. 20. – P. 1414–1415.
5. Generation of OAM radio waves with three polarizations using circular horn antenna array / Xudong Bai et al. // International Journal of Antennas and Propagation. – 2015. – Vol. 2015, No. 5.
6. Generation of OAM radio waves using slot antenna array / D. Liu et al. // Asia-Pacific Microwave Conference (Nanjing, China). – 2015.
7. Generation of OAM waves with circular phase shifter and array of patch antennas / W. Wei et al. // Electronics Letters. – 2015. – Vol. 51, No. 6.
8. OAM multiple transmission using uniform circular arrays: numerical modelling and experimental verification with two digital television signals / R. Gaffoglio et al. // Radio Science. – 2016. – Vol. 51, No. 6. – P. 645–658.
9. The design of array antenna based on multi-modal OAM vortex electromagnetic wave / X. Sun, Yu Du et al. // Progress In Electromagnetic Research Symposium (Shanghai, China). – 2016. – P. 2786–2791.
10. Experimental array for generating dual circularly-polarized dual-mode OAM radio beams / X. Bai et al. // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7, No. 1.
11. Mechanically reconfigurable single-arm spiral antenna array for generation of broadband circularly polarized orbital angular momentum vortex waves / L. Li, et al. // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8, No. 1.
12. Design and analysis of dual-band antenna array generating dual-mode vortex electromagnetic waves / P. Xu et al. // Microwave and Optical Technology Letters. – 2019. – Vol. 61, No. 3. – P. 2275–2281.
13. Generation of OAM radio waves using circular filter-antenna array / S. Li et al. // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (Shanghai, China). – 2020.
14. Rotman lens-based circular array for generating five-mode OAM radio beams / X. Bai et al. // Scientific Reports. – 2016. – Vol. 6, No. 1.
15. Prototyping of 40 GHz band Orbital Angular Momentum Multiplexing System and Evaluation of Field Wireless Transmission Experiments / Y. Yagi et al. // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 130040–130047.

АЛГОРИТМ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ГРОЗ

Н.М. Ооржак, инженер-электроник ООО «ЛЭМЗ-Т»

Научные руководители: Н.Н. Кривин, доцент, зав. каф. КИПР, к.т.н.;

Н.Г. Зайцев, нач. сектора 141 ООО «ЛЭМЗ-Т», преп. каф. КИПР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, oorzhak.nai@yandex.ru

Рассматривается разработка алгоритма (аппаратных реализаций алгоритмов) цифровой обработки сигналов для фильтрации и анализа данных, а также последующее определение и направление гроз. В работе представлены результаты расчёта коэффициентов FIR-фильтра с использованием MATLAB, реализация среднескользящего фильтра на Verilog с порогом для детектирования, а также модуль синхронизации времени с GNSS-приемником для повышения точности временных меток.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, фильтрация сигналов, программируемые логические интегральные схемы, системы для измерения атмосферного электричества, измерение параметров гроз, счётчики молний.

В условиях введения санкций поставки зарубежных грозопеленгаторов сократились, поскольку ключевые зарубежные производители были вынуждены покинуть страну. Это привело к критической нехватке высокоточных систем мониторинга грозовой активности, необходимых для своевременного предупреждения и минимизации ущерба от грозовых явлений. Отсутствие надежного оборудования негативно сказывается на безопасности критически важных объектов инфраструктуры и снижает оперативность реагирования на метеорологические угрозы [1]. В связи с этим возникает необходимость разработки отечественных решений, способных заменить утраченные зарубежные технологии и обеспечить технологическую независимость страны посредством импортозамещения.

Целью работы является разработка эффективного алгоритма цифровой обработки сигналов для фильтрации и анализа входящих грозовых данных с последующим определением направления грозовых разрядов. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- расчёт коэффициентов FIR-фильтра в MATLAB для входных сигналов грозопеленгатора;
- реализация алгоритма скользящей средней фильтра на Verilog в среде Vivado с последующей установкой порога для обнаружения грозовых разрядов в реальном времени;

– реализация модуля синхронизации времени с GNSS-приемником для повышения точности временных меток, необходимых для корректного определения местоположения грозы.

В проекте реализованы аппаратные алгоритмы для ПЛИС:

1. Приём данных с АЦП в ПЛИС. АЦП имеет три канала: первый и второй каналы – рамочные антенны, расположенные перпендикулярно друг другу, предназначенные для определения направления грозовых разрядов. Третий канал – штыревая антенна, используемая для расчёта относительного направления гроз. Частота дискретизации АЦП составляет 125 МГц [2].

2. Вычисление реальных и мнимых составляющих из трёх каналов.

3. Децимация в 200 раз для уменьшения частоты выборок и экономии ресурсов при последующей фильтрации.

4. FIR-фильтр с коэффициентами, рассчитанными в MatLab (рис. 1).

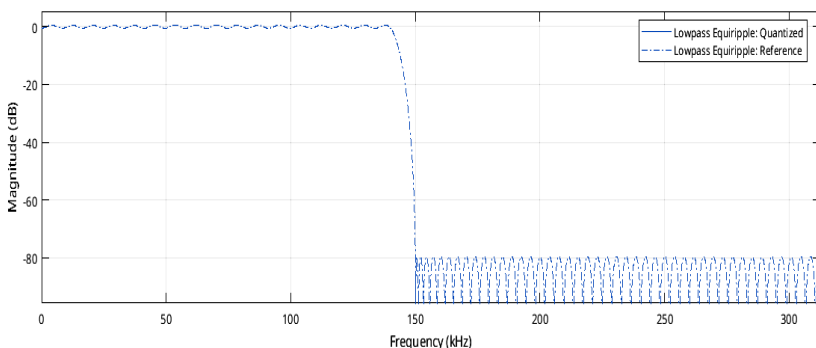


Рис. 1. АЧХ FIR фильтра

5. Запись данных в ОЗУ для дальнейшего анализа.

6. Скользящий средний фильтр с порогом для обнаружения грозового разряда (рис. 2).

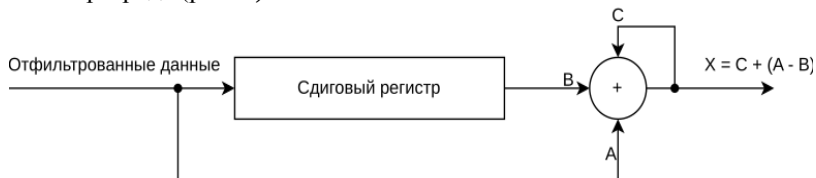


Рис. 2. Структурная схема скользящего среднего фильтра

7. Модуль синхронизации времени с GNSS-приёмником, передающий координаты и временные метки. Для точного вычисления вре-

мени в наносекундах используется сигнал PPS от GNSS, позволяющий рассчитывать время с точностью до 10 нс [3].

Грозопеленгатор оснащён антенным комплексом, состоящим из рамочной и штыревой антенн. Для реализации аппаратных алгоритмов используется плата с ПЛИС и ARM-процессором. Эта плата подключена к хосту по Ethernet, который управляет параметрами ПЛИС, такими как установка порога, изменение частоты DDS (гетеродина в ПЛИС) и другие настройки.

В настоящее время один экземпляр находится в г. Нальчике (рис. 3).



Рис. 3. Грозопеленгатор

В результате работы был создан алгоритм цифровой обработки сигналов грозопеленгатора, включающий FIR-фильтр, коэффициенты которого были рассчитаны в MatLab и скользящей средней фильтра, реализованного на Verilog. Дополнительная интеграция модуля синхронизации времени с GNSS-приемником обеспечила повышение точности временных меток для метода триангуляции [4]. Полученные результаты демонстрируют перспективность дальнейшей аппаратной реализации алгоритмов для создания отечественных грозопеленгаторов, способных компенсировать утрату зарубежных технологий в условиях импортозамещения.

В дальнейшем планируется изготовить три дополнительных грозопеленгатора для реализации метода триангуляции, что позволит определять не только направление, но и точные координаты грозовых разрядов. Кроме того, будут проведены комплексные испытания в

реальных метеорологических условиях для доработки алгоритмов обработки данных и повышения надежности системы в эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аджиева А.А. Современные методы и средства мониторинга грозовой деятельности / А.А. Аджиева, А.Л. Кортиев, Р.А. Гятов // Успехи современного естествознания. – 2023. – С. 64–73.
2. Xilinx Inc. Vivado Design Suite User Guide (UG471). – 2019. – Режим доступа [Электронный ресурс]. – URL: https://docs.amd.com/v/u/en-US/ug471_7Series_SelectIO, (дата обращения: 11.02.2025).
3. Литвинов С.В. Метод синхронизации времени в ГНСС-системах // Информационные технологии и системы. – 2024. – Т. 21, № 4. – С. 24–32.
4. Бугров Н.В. Обзор алгоритмов триангуляции. – М.: Медиас, 2012. – 15 с.

УДК 621.396.96

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ СПИРАЛЬНЫХ ПРОВОДНИКОВ И АНТЕНН

Д.Е. Понамарев, преп., аспирант каф. КИПР

*Научный руководитель Н.Н. Кривин, зав. каф. КИПР, доцент, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, dmitri4ponamarev@gmail.com*

Рассмотрена проблема упрощения разработки и изготовления спиральных проводников с вариативностью физических параметров. Предложен вариант изготовления основания для спирального проводника аддитивным методом. Показано отсутствие влияния материала основания на свойства спирального проводника.

Ключевые слова: закрученные электромагнитные волны, спиральная симметрия, спиральный проводник, аддитивный метод.

В настоящее время для решения задачи повышения информативности радиоканалов применяют характеристику радиоволн, называемую закрученностью электромагнитной волны (ЭМВ) или угловым орбитальным моментом [1]. Однако генерация ЭМВ с ненулевым орбитальным моментом, который как раз и является носителем дополнительной информации, является сложной задачей.

Ранее было показано [2], что существуют различные способы генерации таких волн, включая использование фазированных антенных решёток, дифракционных пластин, параболических антенн специальной формы и т.п. Однако, помимо этого, большой интерес вызывает использование сред со спиральной симметрией, позволяющих преобразовывать после прохождения через себя плоские волны в закрученные [3–6], а именно становится возможным выделение в явном виде

фазового множителя, соответствующего ненулевому значению орбитального углового момента.

Результаты моделирования и экспериментов [7] с ЭМВ, обладающими ненулевым орбитальным моментом и средой, состоящей из спиральных проводников, расположенных определённым образом, т.е. средой, обладающей спиральной симметрией, говорят о необходимости проектирования и изготовления спиральных проводников с различных параметрами (например, сечением проводника, диаметром и шагом намотки) для других практических работ.

Одним из способов быстрого решения поставленной задачи является изготовление основы для спирального проводника аддитивным методом. Главным преимуществом такого метода является возможность изготовления основы как шаблона для намотки проводника с легко изменяемыми параметрами для разных вариантов намотки. В качестве примера был спроектирован спиральный проводник с основанием со следующими параметрами: диаметр проводника 0,5 мм; диаметр намотки 40 мм; шаг намотки 20 мм. Внешний вид проектируемого проводника приведён на рис. 1. Основание включает в себя универсальное крепление, которое не будет меняться при разных параметрах изделия.

В качестве материала для изготовления был выбран пластик PetG. Данный материал отвечает необходимым требованиям по прочности и жесткости. Согласно [8], диэлектрическая проницаемость такого материала составляет 2,55. После печати основания производилась намотка медным проводом, в результате которой был получен спиральный проводник с заданными параметрами (рис. 2).



Рис. 1. 3D-модель спирального проводника с основанием



Рис. 2. Изготовленные спиральные проводники

Для проверки влияния материала основания на параметры проводника было принято решение о проведении эксперимента. Между

двумя рупорными антеннами, расположенными на расстоянии 1,2 м, посередине расположился изготовленный образец. Одна антенна являлась передающей, другая – приёмной. Эксперимент основывался на измерении коэффициента передачи между передающей и приёмной антеннами. Измерения производились на частотах 2,5–4 ГГц, так как спиральный проводник планируется использовать в этом диапазоне.

При проведении эксперимента измерения коэффициента передачи производились при помощи скалярного анализатора цепей R2M04A от компании «Микран» [9]. Схема эксперимента схожа со схемой, описанной в [7], за исключением измеряемого объекта.

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента передачи от частоты, где кривая 1 – коэффициент передачи фона (без спирального проводника), кривая 2 – коэффициент передачи со спиральным проводником. Ввиду почти полного наложения кривых можно сделать вывод об отсутствии влияния материала на свойства проводника.

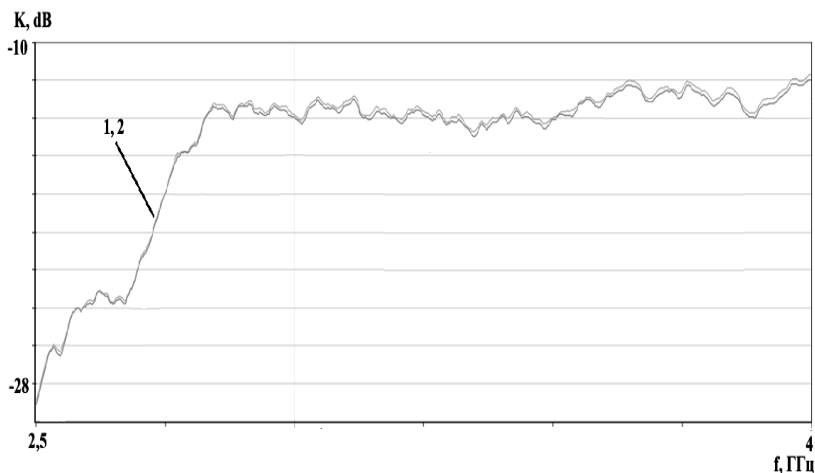


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи от частоты

Таким образом, метод аддитивного производства оснований спиральных проводников упрощает и ускоряет изготовление изделий, что особенно важно для штучных и мелкосерийных партий. Однако его ограничения и возможности применения в других областях требуют дальнейшего изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yagi Y. Prototyping of 40 GHz Band Orbital Angular Momentum Multiplexing System and Evaluation of Field Wireless Transmission Experiments /

Y. Yagi, H. Sasaki, D. Lee // NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation, Kanagawa 239-0847. – Japan, 2022. – Vol. 10. – P. 130040–130047.

2. Ponamarev D. Application of Twisted Radio Waves in a Polarization Radiolocation // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Tomsk, 2022. – P. 1–4.

3. Allen L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes // Physical Review A. – 1992. – Vol. 45, No 11. – P. 8185–8189.

4. Bogdanov O.V. The Probability of Radiation of Twisted Photons in Dispersing Media / O.V. Bogdanov, P.O. Kazinski, G.Yu. Lazarenko // Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures (RREPS-19): book of abstracts XIII International Symposium, September 15–20, 2019. – Belgorod, Russia. – Tomsk: TPU Publishing House, 2019. – 51 p.

5. Barnett S.M. Optical orbital angular momentum / S.M. Barnett, M. Babiker, M.J. Padgett // Philosophical Transactions of the Royal Society A. – 2017. – Vol. 375. – 2087 p.

6. Orbital Angular Momentum Waves: Generation, Detection and Emerging Applications / R. Chen, H. Zhou, M. Moretti, X. Wang, J. Li // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2020. – Vol. 22, No. 2. – P. 840–868.

7. Кривин Н.Н. Численное моделирование эффекта резонансного поглощения электромагнитных волн в среде со спиральной симметрией / Н.Н. Кривин, Д.Е. Понамареv, М.А. Шипуля // Доклады ТУСУР. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 73–78.

8. Влияние температуры на диэлектрическую проницаемость пластиков в СВЧ-диапазоне / А.А. Андреев, Е.А. Рябов, И.В. Хайрушев, Б.В. Сергеева, С.А. Сергеев // Сб. статей X Всерос. науч. школы-семинара / под ред. Ал.В. Скрипаля. – Саратов, 2023. – С. 446–450.

9. Scalar network analyzer R2M series – Micran [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://micran.com/productions/test-measurement/test-measurement-equipment/scalar-network-analyzers/scalar-network-analyzers-r2m-series/>, свободный (дата обращения: 10.03.2025).

УДК 629.7

РОЛЬ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АВИАЦИОННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Т.Н. Пушкарёв, ст. преп. каф. КИПР

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

Проанализирована роль ЧФ в деятельности АТС.

Ключевые слова: безопасность полетов, авиационная транспортная система, человеческий фактор.

Для поддержания необходимого уровня безопасности АТС к ней предъявляются требования – экономичность, эффективность и

безопасность. На АТС действует многочисленная совокупность факторов, влияющих на БП, представленная на рис. 1.



Рис. 1. Группы факторов, влияющих на безопасность полетов

Выявленные факторы систематизированы по пяти группам: технические, человеческие, организационные, общесистемные и внесистемные. При этом организационные и общесистемные факторы, являются производными от технических или человеческих [1, 2].

Согласно данным Международной организации гражданской авиации (ИКАО) и Межгосударственного авиационного комитета (МАК), доля ЧФ, влияющая на БП с начала прошлого века, значительно увеличилась.

Доля факторов (в %), влияющих на БП, представлена на рис. 2.

На рис. 2 проиллюстрирована динамика изменения факторов, влияющих на БП, с начала XX в. по настоящее время. Наблюдается значительный рост доли ЧФ: с 5% в начале прошлого столетия до 45% в середине и 80% в настоящее время. Это обуславливает необходимость углубленного анализа причин роста числа авиационных происшествий (АП) по вине человека.

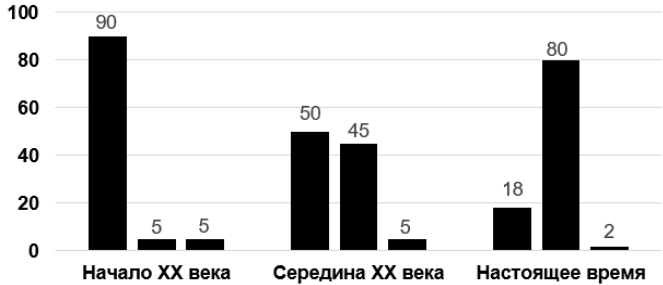


Рис. 2. Доля технического, человеческого и внешнего факторов

Анализ отчетов ИКАО и МАК о состоянии БП за последние десятилетия, при условии принятия ЧФ за 100%, показал, что ошибки летного экипажа (51%) и инженерно-авиационной службы (22%) составляют 73% всех АП, обусловленных ЧФ.

Ключевыми факторами, обусловившими допущенные ошибки, стали: значительная рабочая нагрузка; нехватка времени, приводящая к спешке; отвлечения и прерывания; наличие конкурирующих и взаимосвязанных задач.

Ошибки, приводящие к АП, допущенные другими людьми, вовлеченными в деятельность АТС, установились в интервале 3–8%. Здесь хотелось бы отметить, что наши выпускники, являющиеся специалистами службы ЭРТОС, допускают ошибки, приводящие к АП значительно реже (3% от общего числа АП, обусловленных ЧФ), чем остальные службы. С одной стороны, это говорит о высоком уровне профессиональной квалификации, а с другой стороны, следует принимать во внимание то, что у каждой службы разные функции в организации деятельности АТС.

Анализ влияния ЧФ на обеспечении БП показал его практическую непредсказуемость и склонность к естественным факторам, таким как стимул, утомляемость и др., а также к влияниям окружающей среды, которая выступает в качестве внешнего фактора.

Вопреки тому, что человек может подстраиваться под воздействие на него разного рода факторов, его трудоспособность всё равно в конечном итоге зависит от психофизиологических и личностных его возможностей, которые могут негативно сказываться при осуществлении трудовой деятельности и в той или иной мере влиять на безопасность всей АТС.

Так как каждый человек обладает уникальными индивидуальными как психофизиологическими, так и личностными возможностями, не представляется возможным его унификация, как того подобает авиационная техника.

По причине указанных обстоятельств нужно организовать АТС таким образом, чтобы она соответствовала психофизиологическим и личностным способностям авиационного персонала, а не наоборот.

Кроме того, в условиях динамичного развития авиации требуется пересмотр действующей нормативно-правовой базы, регламентирующей продолжительность и трудоемкость выполняемых функций различных служб, задействованных в деятельности АТС.

В конечном итоге анализ показал, что ЧФ до конца не изучен и есть необходимость и приоритетность учета его влияния на БП и дальнейшего исследования данного фактора, а также поиска перво-

причин ошибок авиационным персоналом, что в перспективе сделает еще более безопасной осуществляемую деятельность АТС, что не так маловажно для потребителей авиационных услуг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Международная организация гражданской авиации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.icao.int/Pages/default.aspx>, свободный (дата обращения: 05.02.2025).

2. Межгосударственный авиационный комитет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mak-iac.org/>, свободный (дата обращения: 05.02.2025).

УДК 621.375.026

РАЗРАБОТКА БУФЕРНОГО УСИЛИТЕЛЯ 10,5–14,5 ГГц ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

В.Е. Щукин, студент каф. ПИШ

Научный руководитель Д.С. Шимановский, вед. инж. НИЛСС ТУСУР

*Проект научно-исследовательской и опытно конструкторской
работы КАФ – ПИШ. Разработка комплекта СВЧ-монолитных
интегральных схем X- и Ku-диапазонов частот
г. Томск, ТУСУР, viktor.e.shchukin@tusur.ru*

Представлена методика проектирования буферного усилителя на основе технологии GaAs с топологической нормой 0,25 мкм. Разработанный усилитель предназначен для работы в диапазоне частот 10,5–14,5 ГГц и обеспечивает выходную мощность до 21,8 дБм при коэффициенте усиления 21 дБ. Усилитель выполнен в монолитной интегральной схеме с использованием Phemt-транзисторов и оптимизированной согласующей структуры для достижения высокой линейности и стабильности. Представлены результаты моделирования топологии с использованием библиотеки производства, подтверждающие эффективность предложенной конструкции. Также проведено сравнение с аналогичными усилителями для демонстрации конкурентных преимуществ разработки.

Ключевые слова: буферный усилитель, GaAs, pHEMT, выходная мощность, согласование импеданса, коэффициент усиления.

В современных радиочастотных системах буферные усилители играют важную роль, обеспечивая согласование уровней сигнала между каскадами и минимизацию отражений. Усилители на основе технологии GaAs демонстрируют высокие значения коэффициента усиления, низкий уровень шума и хорошие линейные характеристики, что делает их идеальными для использования в СВЧ-диапазоне.

В данной работе рассматривается проектирование буферного усилителя на технологии GaAs с рабочим диапазоном частот 10,5–14,5 ГГц. Основной целью является достижение стабильной выходной мощности на уровне 21 дБм при минимальных потерях и высокой линейности.

Разработанный буферный усилитель выполнен в двухкаскадной структуре (рис. 1). Первый каскад обеспечивает предварительное усиление и стабилизацию сигнала, второй каскад предназначен для формирования выходной мощности [1].

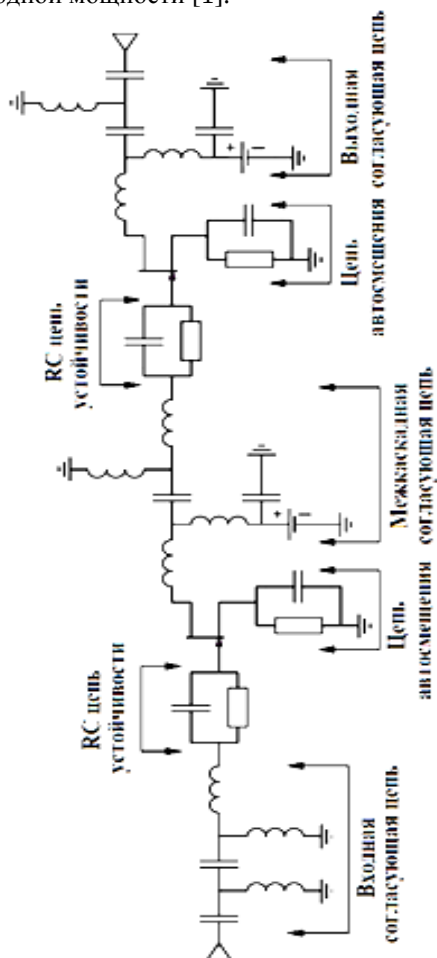


Рис. 1 (начало)

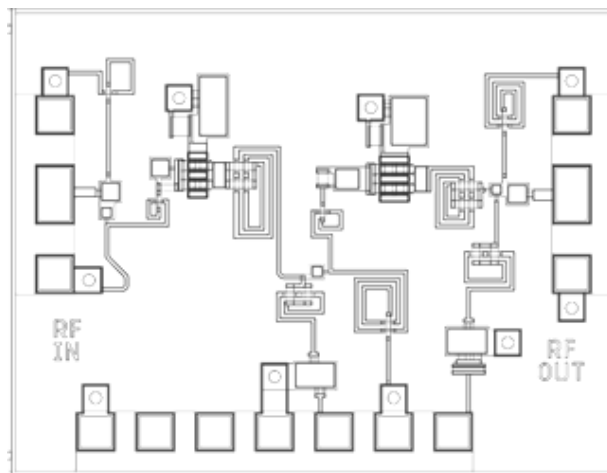


Рис. 1 (окончание). Электрическая принципиальная схема и топология буферного усилителя

На входе в схему стоит конденсатор, который не пропускает постоянный ток на вход микросхемы от источника питания затвора (V_{g1}), также, как и все элементы, находящиеся перед затвором, участвует в согласовании затвора транзистора. Поскольку это реактивные элементы и сопротивление у них зависит от частоты, они настраиваются так, чтобы на входе микросхемы был импеданс 50 Ом, а на входе в транзистор более подходящий импеданс для снятия лучшего усиления, линейности выходной мощности и шума. Также присутствует конденсатор возле источников питания, он настроен таким образом, чтобы большая часть СВЧ-сигнала не стремилась к V_{g}/V_{d} , а в тракт транзисторов (т.е. уменьшает $S(v_{g1},1)$).

Посередине, как и на входе микросхемы, присутствуют согласующие цепи для обеспечения согласованности между транзисторами для получения нужного усиления, равномерности и шума. Конденсатор между каскадами в тракте отделяет постоянные составляющие сигнала от источников питания затвора и стока.

Выход третьего каскада согласуется таким образом, чтобы снять с выходного транзистора требуемую мощность, усиление и равномерность, получая на выходе микросхемы импеданс, равный 50 Ом. Согласующая цепь была разработана на основе модели нагрузочного сопротивления, полученной из контуров равной мощности [2].

Входная и выходная согласующие цепи построены на основе микрополосковых линий с учетом паразитных параметров активных элементов и подложки. Также использовался метод автосмещения

затвора, который позволяет выставить транзистор в нужную нам рабочую точку без использования дополнительного источника питания за счёт источника исток-сток.

Согласование выполнялось с использованием метода контуров равной мощности для обеспечения максимальной выходной мощности и коэффициента усиления. Оптимальное значение нагрузочного сопротивления на выходе составляет $36+5,5j$ Ом, что соответствует максимальной выходной мощности на уровне 23 дБм (рис. 2) [3].

Топология усилителя демонстрирует коэффициент усиления на уровне 21 дБ в рабочем диапазоне частот (рис. 3). Выходная мощность составляет 21,8 дБм при уровне сжатия в 1 дБ.

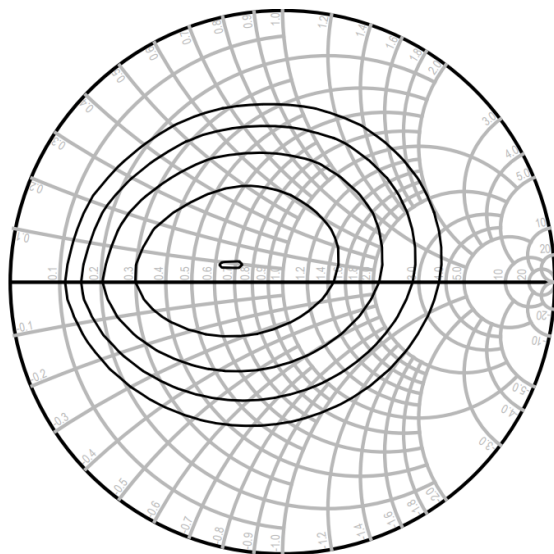


Рис. 2. Контурь выходной мощности на частоте 12,5 ГГц

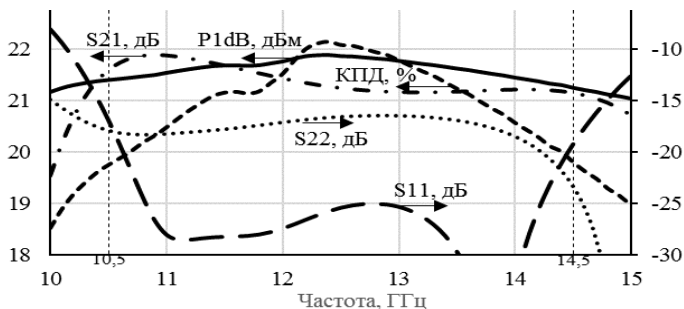


Рис. 3. Результаты моделирования буферного усилителя

Зарубежные аналоги фазовращателя

Аналог	Частота, ГГц	KY, дБ	KCB, дБ	P1dB, дБм	I, мА	VDD, В
ADL8107	7–16	21,5	12; 13,5	16,5	90	+5
HMC7357	7–8,5	28	14; 15	31,5	1200	+8
HMC633LC4	9–17	25	17; 15	18	180	+5
HMC591	6–10	20	12; 11	30	1340	+7
Разработанный	11–14	21,2	25; 17,5	21	90	+8

В результате проделанной работы была смоделирована топология МИС буферного усилителя X, Ku-диапазона частот. Разработанный усилитель имеет преимущества над зарубежными производителями по возвратным потерям, мощности при низком токе потребления, линейности коэффициента усиления (0,5 дБ) и так же будет произведён по отечественной технологии с топологической нормой 0,25 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Титце У. и др. Полупроводниковая схемотехника. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 832 с.
2. Сазонов Д.М. Устройства СВЧ. – М.: Высш. школа, 1981. – 295 с.
3. Zhang S. et al. Design of a Broadband MMIC Driver Amplifier with Enhanced Feedback and Temperature Compensation Technique // Electronics. – 2022. – No. 11(498).

УДК 621.396.96:004.383.3

ФИЛЬТР ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ НА ОСНОВЕ БАЗОВОГО МАТРИЧНОГО КРИСТАЛЛА

Д.А. Вяткин, инженер-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, i.dvyatkin@mail.ru

Рассматривается разработка и оптимизация системы цифровой обработки сигналов для радиолокационных станций на основе отечественных базовых матричных кристаллов (БМК). Представлены результаты моделирования КИХ-фильтра в MATLAB, реализация на языке VHDL и анализ эффективности системы в среде Xilinx Vivado.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, базовые матричные кристаллы, программируемые логические интегральные схемы, КИХ-фильтры, фильтрация сигналов.

Современные радиолокационные системы предъявляют высокие требования к обработке сигналов в реальном времени. В условиях ограниченной производительности отечественных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) и базовых матричных кристаллов (БМК) [1] актуальной задачей является оптимизация алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС) для повышения эффективности обработки.

Использование специализированных архитектур, таких как гетерогенные ПЛИС с аппаратными ускорителями, позволяет значительно увеличить скорость обработки данных, что критично важно для задач радиолокации. Данная работа направлена на разработку и оптимизацию системы цифровой обработки сигналов с учетом архитектурных особенностей отечественных БМК, что способствует импортозамещению и повышению технологической независимости.

Целью работы является разработка системы ЦОС для радиолокационных станций с использованием отечественных БМК, обеспечивающей эффективную фильтрацию сигналов с минимальными задержками и оптимизированным потреблением аппаратных ресурсов. Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

- анализ существующих решений цифровой обработки сигналов;
- выбор оптимального метода фильтрации и его реализация в среде моделирования MATLAB;
- разработка архитектуры цифрового фильтра на языке VHDL [2, 3] с учетом ограничений отечественных БМК;
- моделирование работы системы в программной среде Xilinx Vivado и сравнение с эталонными решениями.

В работе используются методы моделирования цифровых систем, численного анализа и программной реализации алгоритмов. Первоначально проводится моделирование фильтрации сигналов в среде MatLab, затем реализуется оптимизированный алгоритм в среде разработки Xilinx Vivado. Основной акцент сделан на применение КИХ-фильтров, обладающих линейной фазовой характеристикой и высокой точностью обработки. Также проведены исследования влияния различных коэффициентов децимации и разрядности обработки на характеристики выходного сигнала.

Проектирование цифрового фильтра проводилось с учетом ограниченного набора аппаратных ресурсов отечественного БМК [4]. В ходе работы была проведена оптимизация структуры фильтра, включая минимизацию набора используемых видов логических элементов. Анализ выходных характеристик фильтра показал его соответствие необходимому результату, в том числе по уровню подавления неже-

лательных сигналов. На рис. 1 и 2 приведены в сравнение выходные сигналы оригинального фильтра Xilinx и спроектированного при частоте тактирования фильтра $clk = 400$ МГц, частоте дискретизации входного сигнала $fs = 100$ МГц, коэффициенте децимации $decim_rate = 6$.

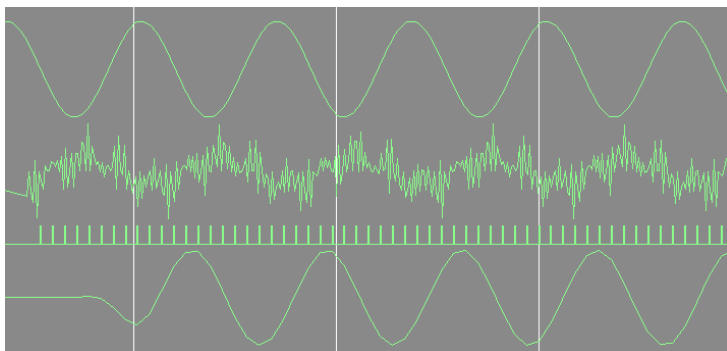


Рис. 1. Выходной отклик спроектированного фильтра

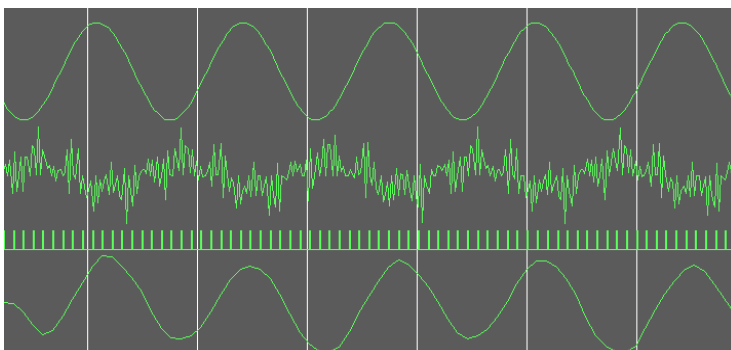


Рис. 2. Выходной отклик оригинального фильтра

В ходе работы были получены следующие ключевые результаты:

- разработана математическая модель цифрового фильтра в MatLab, позволяющая оценить его спектральные характеристики;
- создана VHDL-реализация фильтра с возможностью динамического изменения коэффициентов децимации и тактовой частоты;
- проведено моделирование работы фильтра в Xilinx Vivado;
- обеспечена поддержка динамической реконфигурации частоты тактирования и коэффициента децимации фильтра.

Разработанная система цифровой обработки сигналов представляет собой эффективное решение для современных радиолокацион-

ных станций, работающих в условиях ограниченного вычислительного ресурса. Оптимизация алгоритмов позволила сократить потребление аппаратных ресурсов.

В дальнейшем планируется доработка алгоритмов фильтрации. Дальнейшие исследования будут направлены на интеграцию предложенной системы с реальными аппаратными платформами и проведение тестирования в условиях реальной эксплуатации. Полученные результаты могут быть использованы для создания специализированных цифровых устройств обработки сигналов, что расширяет область их применения в различных высокотехнологичных отраслях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие для вузов. – СПб.: БХВ, 2004.
2. Бибило П.Н. Основы языка VHDL. – М.: Либроком, 2016.
3. Харрис С.Л. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера / С.Л. Харрис, Д. Харис. – М.: ДМК-Пресс, 2021.
4. Базовый матричный кристалл на 10 млн вентилях 5540ТН028 [Электронный ресурс]: официальный сайт компании «Микрон». – URL: <https://mikron.ru/products/high-rel-ic/programmiruemaya-logika-fpga/gate-array/product/5540tn028/?lang=ru> (дата обращения: 01.09.2024).

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 621.373

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

В.С. Костерова, аспирант; Е.С. Морозов, студент каф. РЭ

Научный руководитель С.С. Новиков, доцент каф. РЭ, к.ф.-м.н.

г. Томск, НИ ТГУ, vsk727@yandex.ru, egor.morozov29@gmail.com

Статья посвящена исследованию свойств хаотической динамики системы связанных автогенераторов. Приведены результаты математического моделирования и экспериментальной реализации. Показаны спектральные и временные характеристики колебаний.

Ключевые слова: система автогенераторов, неустойчивость, разрушение когерентности, динамический хаос.

Системы связанных автогенераторов могут работать не только в когерентном, но и в хаотическом режиме [1, 2]. В последнем случае хаотическая динамика реализуется за счет неустойчивости всех возможных когерентных типов колебаний; данный эффект называется разрушением когерентности [1]. Как показывают численные эксперименты [2], динамический хаос возникает при сильных резонансных свойствах связи, формирующих необходимое условие разрушения когерентности. Достаточное условие разрушения реализуется при перенапряженном режиме работы активных элементов [2].

Целью настоящего сообщения является сопоставление результатов математического моделирования хаотической динамики и реального эксперимента.

На рис. 1 приведена исследуемая схема. Два транзисторных автогенератора собраны по трёхточечной схеме. Генераторы максимально идентичны и в автономном режиме генерируют стабильные одночастотные колебания на частоте вблизи $f_0 = 600$ кГц. Цепь связи автогенераторов представляет собой последовательный резонансный колебательный контур r, L, C с общей нагрузкой R_n , настраиваемый на ту же частоту.

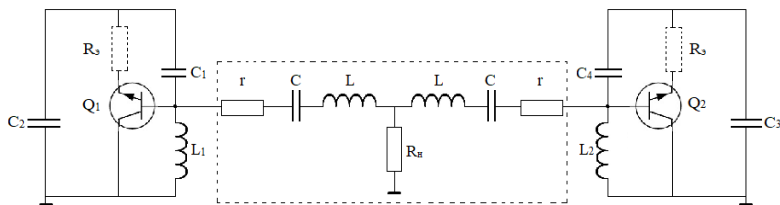


Рис. 1. Схема системы связанных автогенераторов с резонансной связью

На рис. 2 представлены спектральные характеристики хаотических колебаний на одном из генераторов (см. рис. 2, *а*) и на общей нагрузке (см. рис. 2, *б*), полученные путем моделирования в среде NI Multisim. Спектральный состав колебаний отражает механизм разрушения когерентности. Высокие спектральные максимумы описывают частично разрушенные (квазигармонические) колебания, соответствующие базовым противофазным синхронным типам колебаний (мод) $f_n \approx 490$, $f_b \approx 950$. (Частоты указанных мод практически совпадают с собственными частотами трехконтурной резонансной системы.) При полной симметрии схемы колебания этих мод полностью вычитаются на общей нагрузке (см. рис. 2, *б*). Так как динамическая нагрузка для противофазных мод мала, то их амплитуды велики. В результате нелинейного ограничения в спектре колебаний системы возникают компоненты гармоник основных типов колебаний и их комбинации. Так, колебания вторых гармоник верхней противофазной моды суммируются в общей нагрузке. Можно также видеть, что в спектре присутствует компонента с частотой $f_n + f_b$.

На спектре колебаний отмечено положение синфазной моды, совпадающей по частоте с частотами автогенераторов – f_0 . Как видно, данная компонента полностью разрушена, и на ее «месте» формируется непрерывный спектр. Путем специального подбора параметров цепи связи и автогенераторов можно получить хаотический режим с плотным непрерывным спектром во всем диапазоне анализа.

Экспериментальная реализация хаотической динамики в системе связанных автогенераторов полностью соответствует описанной схеме. На рис. 2, *в* представлен спектр колебаний, развиваемых на контуре одного из генераторов. Как видно, спектральный состав колебаний в целом соответствует спектру численного эксперимента и описывает шумоподобную динамику системы. При этом в спектре однозначно можно выделить элементы, соответствующие типам синфазных и противофазных колебаний. На рис. 2, *г* показаны варианты временных выборок хаотических колебаний на контурах автогенераторов и на

общей нагрузке. Просматриваемая на выборках периодичность соответствует спектральным максимумам.

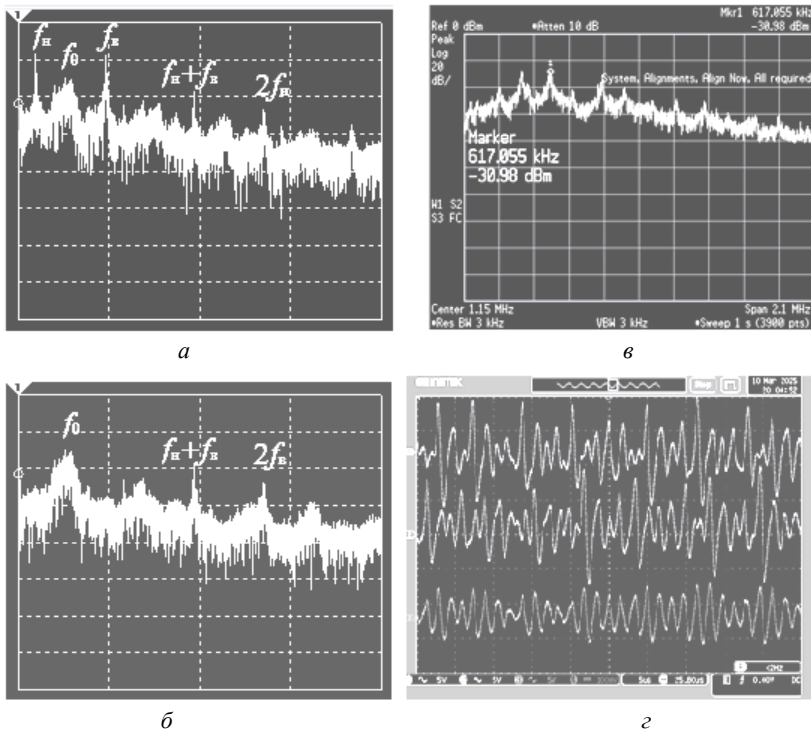


Рис. 2. Спектры в режиме динамического хаоса с одного из контуров (а) и с общей нагрузки (б), численный эксперимент.

Спектр (в) и осциллограмма (г) в режиме динамического хаоса, экспериментальная реализация. Полоса обзора спектров до 2,1 МГц, масштаб по вертикали 20 дБ/дел. Амплитуда колебаний 5 В/дел

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что система двух связанных автогенераторов может служить источником шумовых колебаний с шириной спектра в несколько октав.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков С.С. Явление разрушения когерентности в системе двух связанных СВЧ-автогенераторов / С.С. Новиков, А.А. Усюкевич // Изв. высш. учеб. завед. Физика. – 2014. – Т. 57, № 9/2. – С. 16–20.
2. Костерова В.С., Новиков С.С. Верификация условий перехода системы связанных автогенераторов в режим динамического хаоса / В.С. Костерова, С.С. Новиков // Техника радиосвязи. – 2022. – № 4 (55). – С. 108–117.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ ДИСКРЕТНЫХ АТТЕНУАТОРОВ S-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ 0,5 МКМ GaAs-ТЕХНОЛОГИИ

В.В. Сафенин, Е. Иваненко, студенты

*Научный руководитель А.А. Коколов, зав. лаб. ЛПРИСиСНК, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, viacheslav.v.safenin@tusur.ru*

Представлены результаты моделирования двух монолитных интегральных схем (МИС) 5-разрядных аттенуаторов, работающих в S-диапазоне частот. Разработка основана на 0,5 мкм GaAs-pHEMT-технологии АО «НПФ «Микран». 1-й вариант имеет коэффициенты отражения $S_{11} = -12,6$ дБ и $S_{22} = -15,5$ дБ, СКО амплитудной ошибки 0,315 дБ, СКО фазовой ошибки $19,1^\circ$ и размеры кристалла $2,4 \times 1,2$ мм². 2-й вариант имеет коэффициенты отражения $S_{11} = -15,2$ дБ и $S_{22} = -10,4$ дБ, СКО амплитудной ошибки 0,2 дБ, СКО фазовой ошибки $4,2^\circ$ и размеры кристалла $2,5 \times 1,1$ мм². Тип управления устройствами – параллельный.

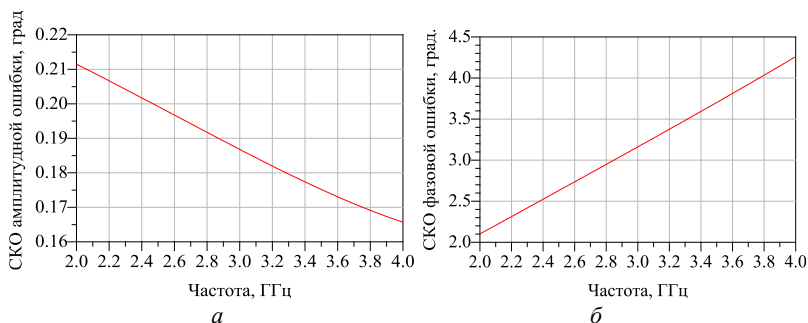
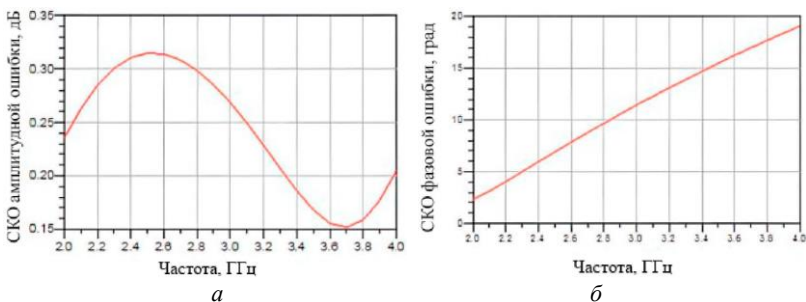
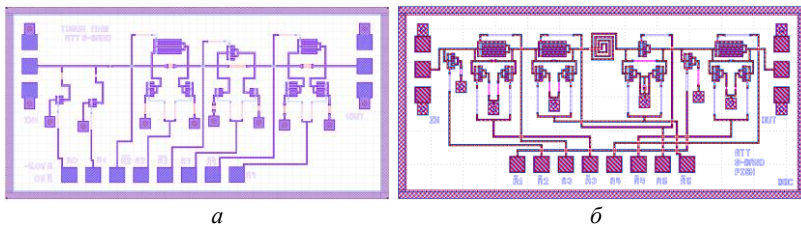
Ключевые слова: аттенуатор, монолитная интегральная схема, СВЧ, GaAs, 0,5 мкм, СВЧ МИС, среднеквадратичное отклонение.

В современных системах связи устройства управления (УУ), работающие в составе приёмопередающих модулей (ППМ) активных фазированных антенных решеток (АФАР), играют ключевую роль. Одним из таких устройств является цифровой аттенуатор (ЦАТТ), который позволяет дискретно изменять амплитуду электромагнитного сигнала без изменения его фазового сдвига. Это необходимо для корректировки диаграммы направленности АФАР [1].

Моделирование МИС аттенуаторов. Учитывая предъявленные требования, была выбрана структурная схема ЦАТТ, состоящая из 5 последовательно соединённых ячеек с подавлениями амплитуд сигнала [2–5]: 1, 2, 4, 8 и 16 дБ. Данный набор ячеек позволяет обеспечивать подавление сигнала от 1 до 31 дБ с шагом отстройки, равным 1 дБ, что обеспечивает его работу в 32 состояниях. Схемотехнические решения ячеек 1 и 2 дБ – «вырожденные», ячейки 4, 8, 16 дБ реализованы в виде П-типа. На рис. 1 приведены два варианта топологий ЦАТТ, причём вторая топология имеет корректирующие элементы в цепи, необходимые для понижения СКО фазовой ошибки.

На рис. 2 представлены графики амплитудной и фазовой среднеквадратической ошибки (СКО) для первого варианта ЦАТТ.

На рис. 3 представлены графики амплитудной и фазовой СКО для второго варианта ЦАТТ.



На рис. 4 представлены графики смоделированных ослаблений амплитуд для всех 32 состояний разработанных вариантов ЦАТТ в полосе частот 2–4 ГГц.

В таблице приведено сравнение параметров разработанных моделей МИС ЦАТТ с зарубежными аналогами, описанными в источниках [2–5].

При сравнении параметров СКО двух промоделированных МИС можно сделать вывод, что вторая МИС значительно превосходит первую. Однако первый вариант ЦАТТ имеет лучшие характеристики согласования вход/выход по сравнению со вторым вариантом.

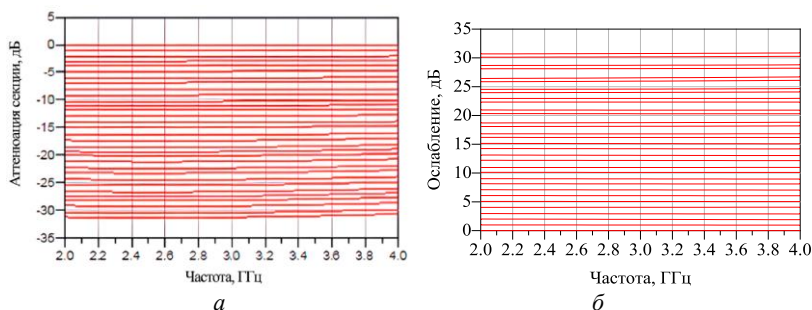


Рис. 4. Графики 32 состояний ЦАТТ: *а* – вариант № 1; *б* – вариант № 2

Сравнение параметров, разработанных МИС ЦАТТ, с аналогами

Характеристика	ЦАТТ № 1	ЦАТТ № 2	[2]	[3]	[4]	[5]
Тех. процесс, мкм	0,5	0,5	0,25	0,25	0,25	0,5
Δf , ГГц	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4
$ S_{11} $, дБ	12,6	15,2	12,3	10,0	15,6	10,2
$ S_{22} $, дБ	15,5	10,4	10,0	15,0	16,0	10,4
Амплитудная СКО, дБ	0,315	0,21	0,1	0,25	0,18	0,4
Фазовая СКО, град	19,1	4,2	1,4	7,75	3,75	2,2
n , бит	5	5	6	5	4	6

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов С. Антенные фазированные решётки. Обзор компонентной базы для реализации приемопередающих модулей / С. Павлов, А. Филиппов // Компоненты и технологии. – 2014. – № 7. – С. 57–62.
2. A Wideband 6-Bit Digital Attenuator in a GaAs pHEMT MMIC // Electronics. – 2024 [Электронный ресурс]. – URL: <https://doi.org/10.3390/electronics11142166> (дата обращения: 11.03.2025).
3. Analog Devices. HMC539ALP3E: 0 to 4 GHz, 5-bit Digital Attenuator, 0.25 dB Step // Newark [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.newark.com/analog-devices/hmc539alp3e/digital-attenuator-0-4ghz-lfcp/dp/50AK1756> (дата обращения: 11.03.2025).
4. An S-K Band 6-Bit Digital Step Attenuator with Ultra Low Insertion Loss and RMS Amplitude Error in 0.25 μm GaAs p-HEMT Technology // Applied Sciences. – 2024 [Электронный ресурс]. – URL: <https://doi.org/10.3390/app14093887> (дата обращения: 11.03.2025).
5. Digital Attenuator, 6-Bit, 0.5 dB LSB step // MACOM Technology Solutions Inc. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.macom.com/products/product-detail/MAAD-011021> (дата обращения: 11.03.2025).

**РАЗРАБОТКА УСИЛИТЕЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ
С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ КОЭФФИЦИЕНТА
ПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ
КМОП-ТЕХНОЛОГИИ**

*К.Е. Шушарина, М.А. Миягашев, инж.-исследователи
ЛПРИСуСНК; А.А. Кокотов, зав. лаб. ЛПРИСуСНК
г. Томск, ТУСУР, kristina.e.shusharina@tusur.ru*

Описаны результаты разработки и моделирования усилителя промежуточной частоты с цифровым управлением усиления на основе отечественной 180 нм комплементарной МОП-технологии. В его основе лежит полностью дифференциальный усилитель с обратной связью по току и напряжению, с помощью которых происходит управление коэффициентом передачи. Потребляемая мощность устройства составила 61 мВт при напряжении питания 3,3 В, частотный диапазон DC – 100 МГц; диапазон усиления – 10–24 дБ с шагом 1 дБ; ошибка усиления – 0,3 дБ; коэффициент шума – 14,68 дБ; размеры кристалла 1,7 мм².

Ключевые слова: КМОП, усилитель промежуточной частоты, 180 нм.

Усилители промежуточной частоты (УПЧ) нашли широкое применение в супергетеродинных радиоприемных устройствах СВЧ. Принцип работы основан на усилении сигнала, который был выделен из радиочастотного диапазона и преобразован в промежуточную частоту. Регулировка усиления необходима для поддержания постоянства сигнала на выходе УПЧ, который обеспечивает нормальную работу приемника, в условиях непостоянного входного сигнала [1].

В основе УПЧ лежит усилительный каскад, коэффициент которого изменяется в зависимости от приложенного управляющего напряжения. УПЧ с регулируемым коэффициентом передачи можно разделить по методу управления усилением на цифровые и аналоговые. Суть аналогового управления заключается в непрерывном изменении напряжения смещения. При цифровом управлении изменение усиления происходит за счет подачи напряжения на цифровые порты или регистры двоичного кода.

Можно выделить следующие способы регулировки коэффициента передачи: матрица токовых зеркал [2]; изменение нагрузочных резисторов [3]; переменная обратная связь по напряжению [4, 5], по току [5].

В данной работе рассматривается разработка усилителя промежуточной частоты с цифровым управлением усилением на основе 180 нм

комплементарной МОП-технологии АО «Микрон». Принципиальная схема единичного каскада УПЧ представлена на рис. 1.

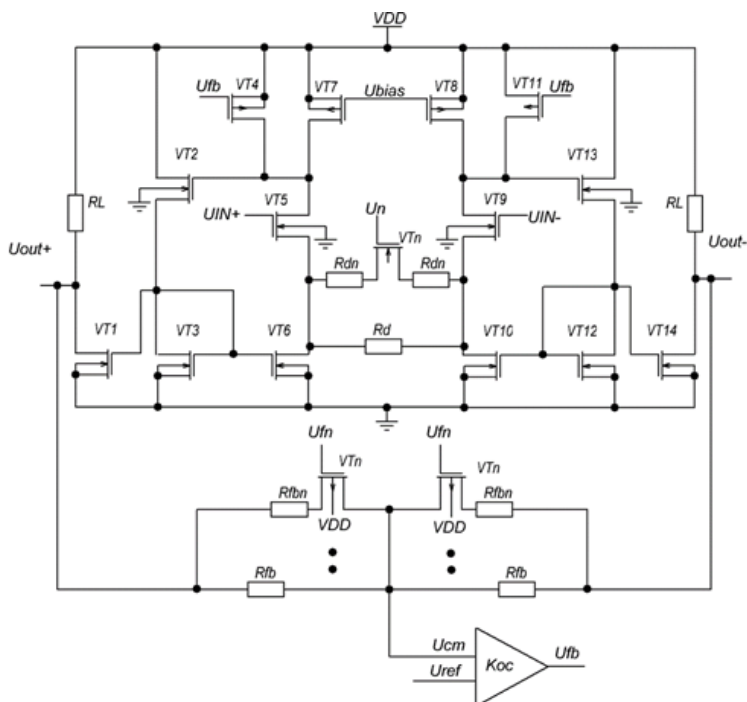


Рис. 1. Принципиальная схема единичного каскада УПЧ

Входной каскад выполнен в виде соединения схемы дифференциального усилителя с обратной связью по току и схемы g_m – бустер, используемой для минимизации зависимости общего коэффициента усиления схемы от усиления входных транзисторов [3, 4]. Для поддержания постоянного уровня выходного напряжения заведена отрицательная обратная связь, реализованная в виде двухкаскадного операционного усилителя. Напряжение U_{cm} , приходящее с выхода УПЧ через резисторы обратной связи, сравнивается с опорным напряжением U_{ref} , которое равняется желаемому уровню выходного сигнала. Выходное напряжение U_{fb} подается обратно на УПЧ [4].

В данном схемотехническом решении объединены два метода управления коэффициентом усиления: переменная обратная связь по току и напряжению. С помощью резисторов обратной связи по току R происходит «грубая» настройка, а резисторы обратной связи по

напряжению R_{fbn} позволяют добиться более точной регулировки усиления [4]. Управляющие сигналы U_n и U_{fn} будут приходить с блока SPI, выполненного на этом же кристалле.

Разработанная схема была промоделирована в среде аналогового проектирования Cadence Virtuoso. Сняты основные технические характеристик устройства при нормальных условиях ($T = 27^\circ\text{C}$). Выходная мощность в точке сжатия на 1 дБ составляет $-5,96$ дБм. Входная мощность при этом составляет $-16,39$ дБм. Максимальное смещение уровня выходного напряжения составило 2,1 мВ; точка ПРЗ составила 5,4 дБм. Диапазон усиления 10–24 дБ с шагом 1 дБ; ошибка усиления $-0,3$ дБ; коэффициент шума $-14,68$ дБ.

При помощи инструмента Parametric Analysis был проведен анализ состояний усиления на частоте 100 МГц. Всего возможных состояний 64, но поскольку использовать все нет необходимости, выбраны с шагом 1 дБ. Зависимость коэффициента передачи от частоты для 16 состояний представлена на рис. 2.

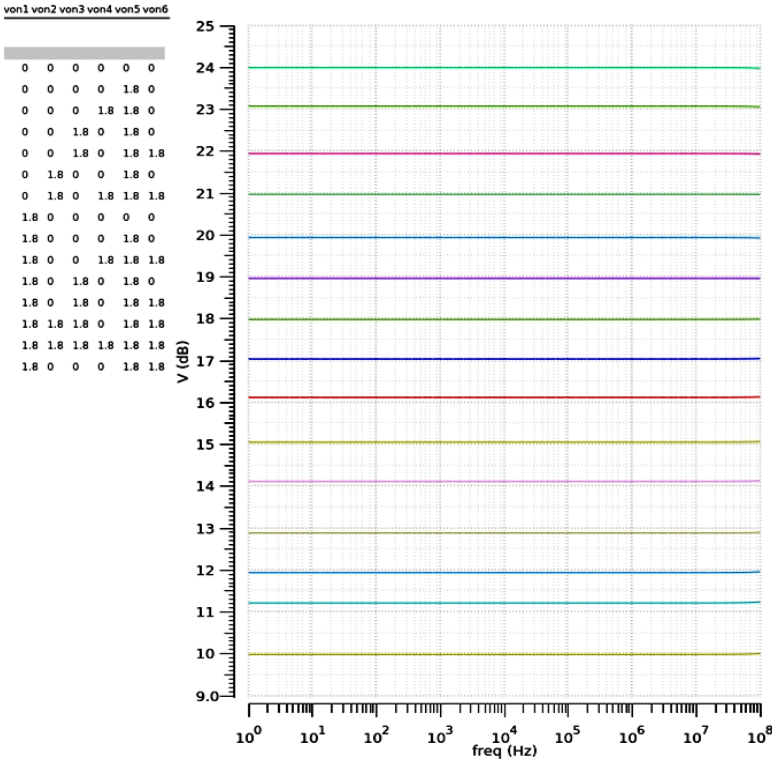


Рис. 2. Зависимости коэффициента усиления от частоты для 16 состояний

Таким образом, на отечественной 180 нм КМОП технологии АО «Микрон» был разработан УПЧ с цифровым управлением коэффициента усиления. Основные характеристики разработанного УПЧ: полоса пропускания – 100 МГц; потребляемая мощность – 61 мВт при питающем напряжении 3,3 В; диапазон усиления – 10–24 дБ с шагом 1 дБ; ошибка усиления – 0,3 дБ; коэффициент шума – 14,68 дБ; площадь топологии – 1,7 мм². Сравнение разработанного устройства с аналогами представлено в таблице.

Сравнительная таблица УПЧ с регулируемым усилением

Аналог	Процесс, мкм	Δf , МГц	$V_{пит}$, В	P_{DC} , мВт	K , дБ	$K_{эф}$, дБ	ΔK , дБ	NF , дБ	S , мм ²
[5]	0,18	40	1,8	1,86	–12–52	–	2,07	–	0,12
[3]	0,35	246	3	27	–15–45	0,3	2	<15	0,64
[4]	0,18	140–270	1,8	11,8	–15–60	0,3	2,5	12,5	0,06
Эта работа	0,18	100	3,3	61	10–24	0,3	1	14,68	0,8

Разработка ИС была выполнена при поддержке Минобрнауки России (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. Макаренко А.А. Устройства приема и преобразования сигналов: учеб. пособие для студ. вузов / А.А. Макаренко, М.Ю. Плотников. – М.: Университет ИТМО, 2019. – 112 с.
2. Wideband 70 dB CMOS digital variable gain amplifier design for DVB-T receiver's AGC / C.-C. Wang, C.-L. Lee, L.-P. Lin, Y.-L. Tseng // IEEE International Symposium on Circuits and Systems (Kobe, 23–26 May 2005). – 2005. – P. 356–359.
3. Mostafa M.A.I. A 60 dB, 246MHz CMOS variable gain amplifier for subsampling GSM receivers / M.A.I. Mostafa, S.H.K. Embadi, M.A.I. Elmala // International Symposium on Low Power Electronics and Design. – Huntington Beach, 06-07 August 2001. – 2002. – P. 117–122.
4. Rahmatian B. A low-power 75 dB digitally programmable variable-gain amplifier in 0.18um CMOS / B. Rahmatian, S. Mirabbasi // Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering. – 2007. – Vol. 32. – P. 181–186.
5. Delshadpour S. A 64 dB Dynamic Range Programmable Gain Amplifier for Dual Band WLAN 802.11abg IF Receiver in 0.18 μ m CMOS Technology // 31st IEEE International System-on-Chip Conference. – Arlington, 04–07 September 2018. – 2019. – P. 29–32.

КОРРЕКЦИЯ МЕЖСИМВОЛЬНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ OQPSK-МОДУЛЯЦИИ

*Н.А. Архипов, аспирант каф. радиотехники и радиосистем
г. Владимир, Владимирский гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых
polushin.p@mail.ru*

Рассмотрен метод подавления межсимвольных искажений цифровых сигналов, основанный на использовании специальных корректирующих символов. Корректирующие символы помещаются перед информационными символами. Приведен пример структурной реализации метода.

Ключевые слова: цифровые сигналы, межсимвольные искажения, коррекция искажений.

При передаче цифровых сигналов по многолучевым каналам обычно возникают межсимвольные искажения (МСИ). Они проявляются в рассеянии энергии каждого символа по времени, в результате чего соседние символы накладываются друг на друга и интерферируют, что значительно ухудшает помехоустойчивость передачи [1–3].

OQPSK-модуляция (offset quadrature phase shift keying) является вариантом QPSK-модуляции. В ней квадратурные компоненты передаваемого сигнала сдвигаются по времени одна относительно другой на половину длительности одного символа. В результате уменьшаются скачки фазы и улучшаются энергетические показатели передатчика.

Предлагается использовать корректирование возникающих искажений в двухсторонних линиях передачи. При этом возможно измерить параметры МСИ и транслировать соответствующую информацию обратно на передающую сторону. Эта информация используется для снижения влияния МСИ.

Для этого применяется избыточность количества передаваемых символов для компенсации ошибок, но в отличие от методов помехоустойчивого кодирования коррекция направлена именно на устранение МСИ. Для этого перед каждым передаваемым информационным символом передается специальный корректирующий символ. Поскольку на передающей стороне известна сумма остатков от предыдущих символов, которая в приемнике наложится на текущий символ, то величина специального корректирующего символа регулируется таким образом, чтобы либо полностью убрать эту сумму, либо снизить ее уровень.

Укрупненная структурная схема устройства, реализующего описываемый метод, приведена на рис. 1. Передаваемые информацион-

ные промодулированные символы поступают на вход первого блока памяти БП1 и на один из входов коммутатора К. В БП1, который может быть выполнен в виде сдвигового регистра, запоминается последовательность, при поступлении каждого нового символа последовательность сдвигается.

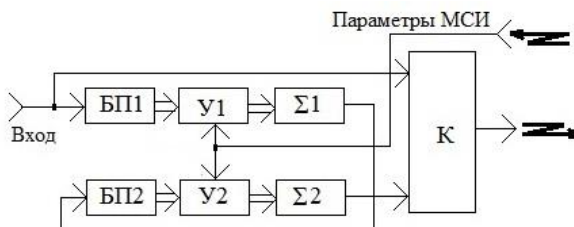


Рис. 1. Структурная схема для реализации описываемого метода

По служебному каналу от противоположной станции приходят измеренные величины параметров МСИ. В многоканальном умножителе У1 они умножаются на комплексные величины запомненных в БП1 символов, далее в сумматоре С1 результаты умножения складываются, моделируя ту сумму, которая в приемнике наложится на передаваемый символ, образуя МСИ.

Для формирования компенсирующего символа эта сумма поступает на блок памяти БП2, который тоже выполнен в виде сдвигового регистра. При прохождении канала передачи корректирующие символы также подвергаются МСИ. Чтобы учесть это в многоканальном умножителе У2, их значения также умножаются на соответствующие коэффициенты для корректирующего символа, и в сумматоре С2 формируется символ для коррекции текущего информационного символа. С помощью коммутатора на передачу поочередно подключается информационный символ и предваряющий его корректирующий символ.

Таким образом, МСИ либо устраняются, либо их уровень ставится существенно меньшим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ипатов В.П. Системы мобильной связи: учеб. пособие для вузов / В.П. Ипатов и др. – М.: Горячая линия–Телеком, 2003. – 272 с.
2. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. – М.: Радио и связь, 2000. – 453 с.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Вильямс, 2002. – 1104 с.

**ПАССИВНОЕ АКУСТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ БПЛА:
АНАЛИЗ МЕТОДОВ, ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ И РАЗРАБОТКА
МИКРОФОННОГО МОДУЛЯ**

Г.М. Дударев, М.А. Проскуряков,

П.Л. Тимошин, студенты каф. РТС

*Научный руководитель Н.П. Красненко, д.ф.-м.н., проф. каф. РТС
Проект ГПО РТС-2401. Методы и системы для обнаружения дронов
г. Томск, TUSUP, krasnenko@imces.ru*

Рассматриваются методы пассивного акустического обнаружения БПЛА, анализируются ключевые факторы, влияющие на их работу, и возможные меры по их учету. Проведен расчет дальности обнаружения в различных условиях, выбран прототип системы и разработан эскизный проект приемного микрофонного модуля. Построены графики звуковой интенсивности, создана 3D-модель модуля и предложена схема малошумящего усилителя.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, мультикоптер, акустика, обнаружение малоразмерных низколетящих летательных аппаратов.

Преимущества и недостатки пассивного акустического обнаружения БПЛА. Пассивное акустическое обнаружение позволяет выявлять БПЛА, используя их акустические сигнатуры. Основные достоинства метода заключаются в его пассивности, что делает систему незаметной для обнаруживаемых объектов, всепогодности, позволяющей работать в сложных условиях, таких как туман, дождь и темное время суток, а также простоте и экономичности, так как оборудование для обработки акустических сигналов сравнительно недорогое и легко интегрируемое. К недостаткам относятся ограниченная дальность, так как звуковые волны затухают быстрее, чем радиоволны, что снижает эффективность метода на больших расстояниях, а также чувствительность к окружающей среде, поскольку температура, влажность, ветер и шумы будут искажать сигнал и ухудшать точность обнаружения.

Факторы, влияющие на акустическое обнаружение. На эффективность работы пассивных акустических систем оказывают влияние различные внешние условия. Температура воздуха напрямую влияет на скорость распространения звука, например, при +20 °С она составляет 344 м/с, а при –20 °С снижается до 318 м/с. Ветер может изменять фазовую скорость звука и приводить к его рассеянию, а атмосферная турбулентность вызывает флуктуации температуры и плот-

ности воздуха, что дополнительно искажает звуковые сигналы. Осадки и аэрозоли частично рассеивают и поглощают звуковые волны, снижая дальность обнаружения. Кроме того, необходимо учитывать потери на сферическую расходимость, поскольку интенсивность звука убывает пропорционально квадрату расстояния от источника.

Выбор концепции и проектирование системы обнаружения.

Выбрана концепция пассивной акустической сети, состоящей из нескольких микрофонных модулей [1]. Каждый модуль включает разнесенные микрофоны для пространственного анализа сигнала, камеру для визуального подтверждения цели и радиоканал для передачи данных с минимальным временем работы в эфире. Разработан макет микрофонного модуля, в котором размещены 10 электретных микрофонов на одной плате. Корпус модуля будет напечатан на 3D-принтере из PETG пластика и дополнительно защищен лаком от влаги и ультрафиолета. 3D-модель микрофонного модуля и прототип, на котором основана разработка, показаны на рис. 1.

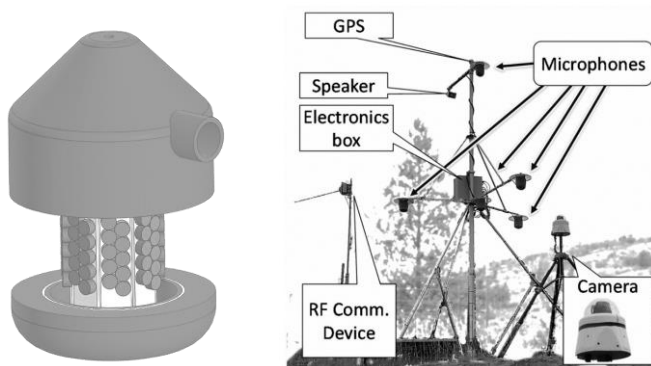


Рис. 1. Корпус микрофонного модуля и прототип [1]

Расчет дальности обнаружения. Проведены расчеты дальности распространения звука двумя методами: ГОСТ 31295.1–2005 [2] и аналитической моделью [3, 4]. Основные выводы показывают, что при $+20^{\circ}\text{C}$ дальность обнаружения составляет 280–320 м в зависимости от частоты, при -20°C дальность сокращается на 10–15% из-за изменения скорости звука, а расчеты по ГОСТ дают несколько завышенные результаты по сравнению с аналитическим методом, что требует дополнительной экспериментальной проверки. График зависимости уровня звукового давления от расстояния при температуре 20°C (расчитанный через ГОСТ) представлен на рис. 2.

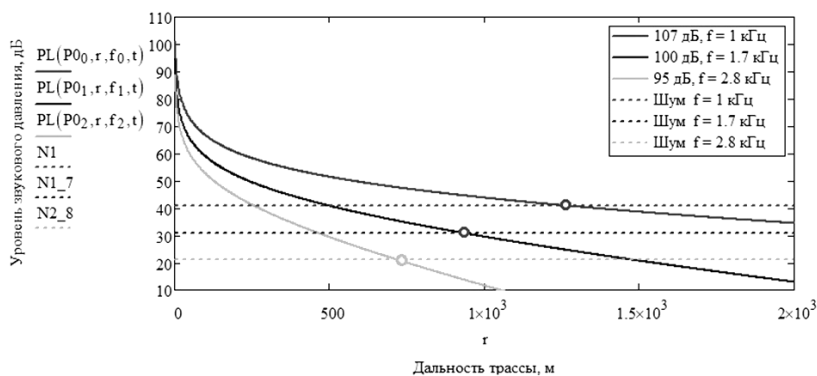


Рис. 2. Зависимость уровня звукового давления от дальности трассы при температуре окружающей среды $+20^\circ\text{C}$ [2]

Выбор микрофонов и усилителя. Оптимальными оказались электретные микрофоны Panasonic WM-61 [5] и DGO4522DD [6], так как они компактны, не требуют качественного фантомного питания и обеспечивают широкий частотный диапазон (20–20 000 Гц). Для усиления сигнала использована микросхема NE5532, которая обеспечивает низкий уровень шума при усилении и выполняет функцию согласования с микрофонами при коэффициенте усиления около 100 раз. Схема усилителя представлена на рис. 3.

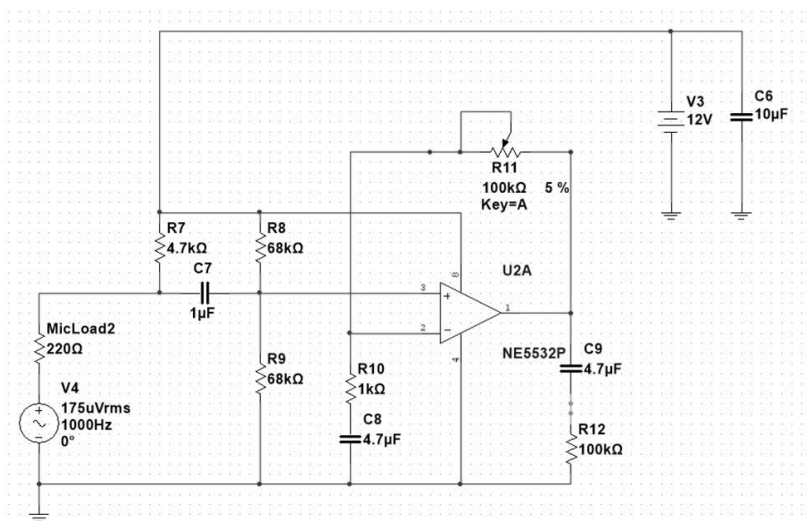


Рис. 3. Принципиальная схема усилителя

Заключение. Анализ показал перспективность пассивного акустического обнаружения БПЛА. Разработанный макет микрофонного модуля и методика обнаружения будут использоваться для дальнейших испытаний и доработок. Предполагается провести полевые испытания для проверки расчетных данных и калибровки алгоритмов обработки сигнала в дальнейших семестрах ГПО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Passive acoustic detection, tracking and classification system and method: пат. US 2017/0139031A1 No. 61/782,478 / H. Salloum, A. Sedunov, N. Sedunov, A. Sutin; заявл. 13.03.2014; опубл. 18.03.2017.
2. ГОСТ 31295.1–2005. Шум. Затухание звука при распространении на местности. – М.: Стандартинформ, 2006. – 34 с.
3. Красненко Н.П., Одинцов С.Л. Анализ коэффициента поглощения звука в воздухе. – М.: Ротапринт ТФ СО АН СССР, 1984. – 32 с.
4. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. – М.: Водолей, 2001. – 279 с.
5. Технические параметры электретного микрофона DGO4522DD [Электронный ресурс]: сайт интернет-магазина АО «ЧИП и ДИП». – Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib/382/DOC009382888.pdf>, свободный (дата обращения: 13.12.2024).
6. Технические параметры электретного микрофона Panasonic WM-61. [Электронный ресурс]: сайт интернет-справочника Alldatasheet.com. – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/528408/PANASONIC/WM-61A.html>, свободный (дата обращения: 13.12.2024).

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 004.932.4

РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Э.Д. Менухов, В.Х. Абдуллаев, К.С. Курпиянова, студенты
Научный руководитель А.В. Каменский, доцент каф. ТУ, к.т.н.
Проект ГПО ТУ-2002. Исследование и разработка методов анализа
и обработки фото- и видеоданных в телевизионных
измерительных системах
г. Томск, ТУСУР, eduard_menukhov@vk.com

Описана реализация линейных и нелинейных цифровых фильтров для обработки изображений, позволяющих подавлять шумы и улучшать качество изображений. Осуществляется сравнение данных методов фильтрации и их эффективность при подавлении различных типов шумов. В качестве инструмента реализации была выбрана среда разработки Qt Creator.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, цифровые фильтры, нелинейные фильтры, линейные фильтры, подавление шумов.

Цифровые фильтры играют ключевую роль в современных системах обработки изображений. Они позволяют улучшать качество изображений, подавлять шумы, выделять контуры объектов и решать многие другие задачи, важные для анализа фото- и видеоинформации.

Нелинейные методы фильтрации являются важным инструментом в обработке изображений, широко используемым для решения различных задач, таких как подавление шума, повышение контрастности, сглаживание текстур и выделение объектов.

Разработаны и протестированы следующие нелинейные фильтры:

1. *Медианный фильтр.* Один из известных нелинейных методов обработки изображений, где каждый пиксель изображения заменяется медианой значений его окрестности. Метод больше всего подходит для устранения случайного импульсного шума.

2. *Биномиальный фильтр*. Данный фильтр осуществляет вычисление взвешенного среднего значения интенсивности для каждого пикселя, где вес соседних пикселей определяется исходя из их пространственного расположения и степени схожести интенсивностей с центральным пикселем.

Линейная фильтрация выполняется посредством операции дискретной свертки, в которой применяется ядро фильтра, задающее весовые коэффициенты для соседних пикселей. Данный метод позволяет добиваться различных эффектов, таких как размывание изображения или выделение его границ.

Разработаны и протестированы следующие линейные фильтры:

3. *Скользящее среднее*. Это метод обработки изображений, где значение каждого пикселя заменяется средним значением пикселей в его окрестности. Этот метод используется для сглаживания, уменьшения шума и выделения крупных объектов.

4. *Метод Лапласа*. Важный инструмент в обработке изображений для выделения границ и контуров объектов. Он основан на вычислении вторых производных яркости изображения, что позволяет находить области с резкими изменениями интенсивности.

Для реализации фильтров использовались возможности интегрированной среды разработки Qt Creator, обеспечивающей удобные инструменты для написания программного кода на C++. В рамках данной работы реализованные фильтры были успешно протестированы в цифровой видеолaborатории DiViLab.

Для тестирования разработанных фильтров взято тестовое изображение с наложенным шумом Гаусса, представленное на рис. 1.

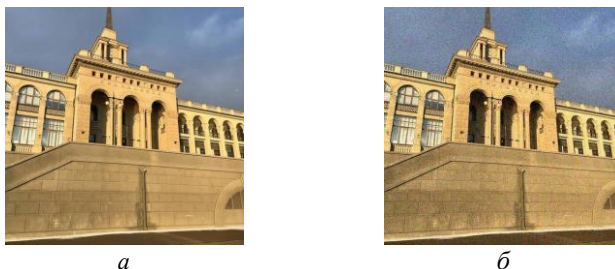


Рис. 1. Тестовое изображение: *а* – без добавления шума, *б* – с добавлением шума

Результат обработки изображений разработанными фильтрами представлен на рис. 2. В таблице приведены результаты оценки качества обработки зашумленных изображений.

Для оценки качества обработанных изображений использовались следующие метрики:

- ПОСШ (пиковое соотношение сигнал/шум) – это показатель, который измеряет качество обработанного изображения путём сравнения его с исходным при условии, что оба изображения имеют одинаковое разрешение;

- норма Минковского ($p=2$) – измеряет отклонение от оригинала, низкие значения (измеряемые как условная единица – у.е.) показывают точность, Евклидова норма ($p=2$) задаёт расчёт по принципу среднеквадратического отклонения, что позволяет оценить степень искажения изображения;

- МСП (мера структурного подобия) – оценивает сходство структурных характеристик между изображениями;

- средний контраст – мера различий между яркостями соседних пикселей; при этом его высокое значение (измеряемое как условная единица – у.е.) указывает на чёткую проработку границ, текстур и мелких деталей;

- СКО (среднее квадратическое отклонение) – показывает, насколько интенсивности пикселей изображения отклоняются от среднего значения.

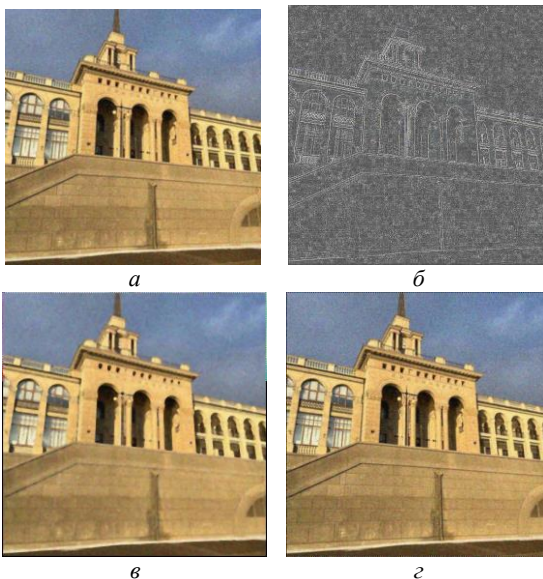


Рис. 2. Обработанные изображения: *а* – скользящее среднее; *б* – фильтр Лапласа; *в* – медианная фильтрация; *г* – биномиальная фильтрация

Результат оценки качества обработки разработанными фильтрами

Метод фильтрации	Показатель оценки				
	ПОСШ, дБ	СКО	МСП	Норма Минковского, у.е.	Средний контраст, у.е.
Исходное (с шумом)	25,74	44,68	0,86	4 246,66	31,66
Скользящее среднее	28,45	30,22	0,78	4 100,75	28,25
Фильтр Лапласа	26,90	35,50	0,82	4 205,12	29,70
Медианный	27,83	32,45	0,79	4 150,00	29,10
Биномиальный	27,20	33,60	0,76	4 184,60	29,68

На основе полученных данных из таблицы, можно сделать следующие выводы:

1. Фильтр Лапласа демонстрирует наименее эффективное подавление шума, поскольку ПОСШ увеличился незначительно (26,90 дБ, прирост на 4,5%), а СКО снизилось на 20,5%. Однако фильтр улучшает детализацию, повысив средний контраст на 6,4%.

2. Медианный фильтр наиболее эффективно снижает отклонения пикселей (норма Минковского 4 150 у.е., снижение на 2,3%) и демонстрирует высокие значения ПОСШ (27,83 дБ) и среднего контраста (29,10 у.е.), что делает его оптимальным для подавления шума при сохранении структуры изображения.

3. Скользящее среднее показывает умеренные результаты – ПОСШ вырос до 28,45 дБ (прирост на 10,5%), а СКО снизилось на 32,4%. Однако средний контраст значительно снизился (28,25 у.е.), что ухудшает визуальное восприятие деталей.

4. Биноминальная фильтрация демонстрирует сбалансированные показатели: ПОСШ увеличился на 5,7%, СКО снизилось на 24,8%, а средний контраст практически не изменился (29,68 у.е.).

Таким образом, медианная фильтрация показала наилучшие результаты в снижении шума и сохранении структуры изображения, а фильтр Лапласа выделяется лучшей детализацией контуров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1071 с.
2. Алгоритм скользящего среднего (Simple Moving Average) [Электронный ресурс] // Ежедневное интернет-издание. – Режим доступа: <http://www.habr.ru/ru/articles/134375>, свободный (дата обращения: 07.03.2025).
3. Методы ранговой фильтрации в системах видеонаблюдения / Р.В. Гут, А.П. Кирпичников, С.А. Ляшева, М.П. Шлеймович // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 17. – С. 71–73.
4. Борисков Ю. Медианный фильтр низкочастотного и высокочастотного прохождения // Сайт группы компаний Пергам [Электронный ресурс]. – Ре-

жим доступа: <http://www.pergam.ru/press/blogs/median-filters.htm>, свободный (дата обращения: 10.03.2025).

5. Филиппов М.В. Быстрый метод билатеральной фильтрации изображений / М.В. Филиппов, О.С. Ермилова // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2017. – № 20. – С. 29–36.

6. Сравнение объективных методов оценки качества цифровых изображений / А.В. Кокошкин, В.А. Коротков, К.В. Коротков, Е.П. Новичихин // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2015. – № 6. – 11 с.

УДК 004.932.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗМЕРА ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ ВЫРАВНИВАНИЯ ГИСТОГРАММЫ, ПРИМЕНЯЕМЫХ К ВИДЕОКАДРАМ, ПОЛУЧЕННЫМ В НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИНАХ

Е.В. Зайцева, доцент каф. информатики и компьютерных технологий; Е.И. Арефьева, студентка каф. разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений

***г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, Zaytseva_EV@pers.spmi.ru***

Описана особенность применения методов контрастирования к видеокадрам, полученным с глубинных телевизионных систем. Анализ произведен на основе видеокadra с изображением фильтра в скважине. Рассмотрен метод адаптивного выравнивания гистограммы с учетом параметра количество блоков, рассчитаны количественные характеристики качества видеокadra.

Ключевые слова: техническое зрение, автоматизированная система, глубинная телевизионная система, нефтяные и газовые скважины.

В настоящее время технологии видеонаблюдения активно применяются в сфере нефтегазовой промышленности. Глубинная телевизионная видеосъемка ведётся по каротажным кабелям в режиме реального времени. Кадры, приведённые в работе, взяты у компании, выпускающей такие видеосистемы, – ООО ПФ «Аленд». При глубинной съемке возникают проблемы с размытием и нечёткостью видеокadров, так как выбранная среда имеет малую освещённость кадра [1]. Также существует проблема размытия кадра, так как условия работы достаточно сложные, диаметр скважины небольшой и съёмочная система находится вблизи объекта съёмки. В данной работе была проведена количественная оценка качества видеокadra и его преобразования при помощи метода CLAHE на языке MatLab.

На рис. 1, *а* приведён видеок кадр фильтра у забоя. Проанализировав изображение, видим, что оно затемнено и сильно размыто в левой части, поэтому плохо визуализируется. На рис. 1, *б* приведена гистограмма распределения яркости этого кадра. На гистограмме стоит обратить внимание на пик более 30 000 пикселей в районе яркости от 0 до 10, что подтверждает визуальная оценка. Также видим уменьшение количества пикселей, приближаясь к отметке яркости более 100. Для дальнейшей оценки вычисляем среднее значение яркости.

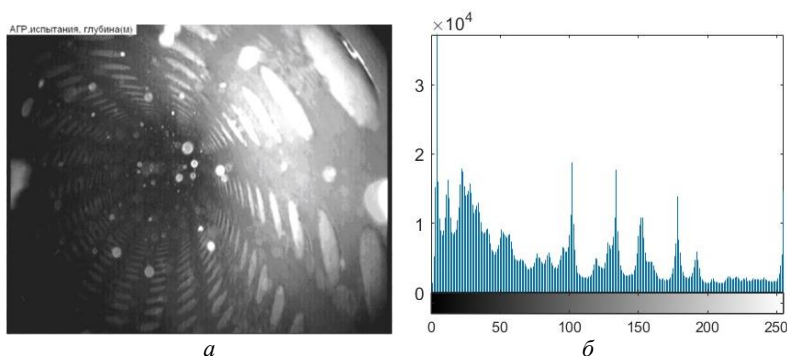


Рис. 1. Изображение фильтра в скважине (*а*) и его гистограммы распределения яркости (*б*)

К видеоккадру на рис. 1, *а* будем применять метод CLAHE. Изображение делится на отдельные блоки («плитки»), в каждом из которых вычисляются интегральные гистограммы, далее использующиеся для изменения яркости видеоккадра. Перед выравниванием гистограмм блоков необходимо ввести исходные параметры.

Первый такой параметр – контрастный предел улучшения – предотвращает перенасыщение изображения. Путем многочисленных практических исследований установлено, что он приравняется к единице, делённой на среднее значение яркости в исходном кадре. Также есть возможность задать форму, под которую будет изменяться гистограмма: плоская, экспоненциальная или колокольная. В данном случае использовалась экспоненциальная форма как наиболее эффективная при оценке, что также проверено многочисленными экспериментами. В данной работе параметр, который будет проанализирован, – это количество блоков (NT). Он делит изображение на заданное количество строк и столбцов мозаики.

Оценка качества исходного и обработанного видеоккадров происходит с помощью метода Tenengrad [2].

При рассмотрении различных значений параметра NT была замечена зависимость от размеров кадра, в нашем случае 650×808 элементов. Соотношение сторон NT должно оставаться таким же, как у исходного видеокadra (таблица).

Характеристики изображений при изменении параметра NT

Изображение	Среднее значение уровня яркости	Tenengrad
Исходное	80,4712	113,9389
CLAHE NT [4 5]	92,0942	143,0457
CLAHE NT [5 4]	92,9314	142,2710
CLAHE NT [8 10]	88,2991	147,4526
CLAHE NT [10 8]	88,5164	147,0389
CLAHE NT [12 15]	86,6270	149,1673
CLAHE NT [15 12]	86,7673	149,0435
CLAHE NT [16 20]	86,5560	150,1577
CLAHE NT [20 16]	86,2978	150,0837
CLAHE NT [24 30]	87,8984	152,3924
CLAHE NT [30 24]	86,3933	150,8383
CLAHE NT [8 8]	89,1120	146,8291
CLAHE NT [12 12]	86,8209	148,5932
CLAHE NT [16 16]	86,8183	149,8378
CLAHE NT [20 20]	86,6725	150,7857
CLAHE NT [2424]	86,6530	151,4907

Наилучшие параметры изображения получены при NT 24 и 30, видеокادر, полученный в результате работы алгоритма, представлен на рис. 2, а, а на рис. 2, б приведена гистограмма распределения яркости к нему.

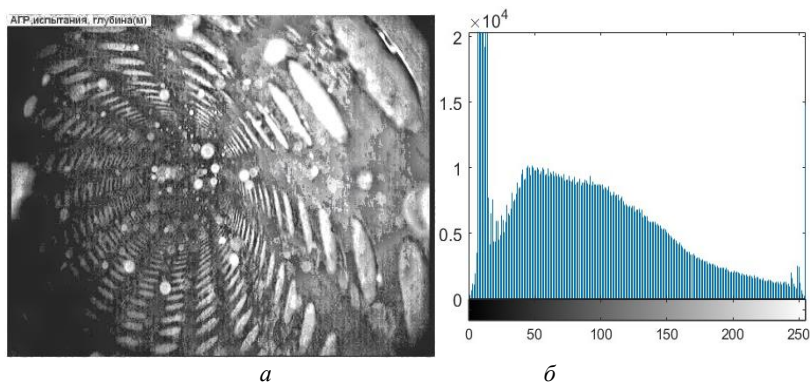


Рис. 2. Обработанный кадр и его гистограмма

Проанализировав гистограмму, видим, что амплитуда пика заметно упала и произошло перераспределение на другие уровни яркости, благодаря чему левая часть видеокадра стала более светлой. В целом по кадру пиксели распределилась более равномерно, в основном в пределах от 50 до 125. Повысилась контрастность изображения, что можно увидеть по значению параметра *Tenengrad*.

Благодаря проведенным экспериментам была получена зависимость параметра NT от размера видеокадра, что позволяет автоматизировать процесс контрастирования видеокадров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подходы к цифровой обработке изображений в горной промышленности / Е.В. Зайцева, А.А. Кочнева, Е.В. Катунцов, М.Р. Киба // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13, № 1 (65). – С. 62–67.

2. Сидоренко А.С. Методы фокусировки фотоустройств для улучшения качества изображений / А.С. Сидоренко, Н.Н. Гринченко // Методы и средства обработки и хранения информации: межвузовский сборник науч. трудов. – Рязань, 2019. – С. 16–20.

УДК 004.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАУССОВСКОГО ШУМА НА ТОЧНОСТЬ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ МОДЕЛЬЮ YOLOv11

Г.Е. Эдель, аспирант каф. ТУ

*Научный руководитель В.В. Капустин, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, german.edel99@gmail.com*

Работа посвящена анализу того, как гауссов шум сказывается на производительности модели YOLOv11 при обнаружении объектов. Результаты экспериментов показали, что при слабом шуме (до 30%) алгоритм сохраняет стабильную точность. Однако при усилении шумового воздействия качество изображений (оцениваемое по MSE и PSNR) и способность модели к детекции заметно ухудшаются. Эти данные подчеркивают важность создания более надежных решений для работы в неблагоприятных условиях.

Ключевые слова: гауссов шум, YOLOv11, распознавание объектов, компьютерное зрение, среднее квадратическое отклонение (MSE), пиковое отношение сигнал/шум (PSNR).

Технологии компьютерного зрения применяются в различных сферах: от беспилотных автомобилей до медицины и систем безопасности. Несмотря на высокую точность алгоритмов в идеальных условиях, их эффективность в реальной среде снижается из-за искажений,

таких как размытость и шум. Гауссов шум, вызванный несовершенством оборудования или передачи данных, является одной из таких проблем [1, 2].

Целью исследования является анализ влияния гауссова шума на модель YOLOv11 с использованием метрик MSE и PSNR для оценки качества изображений и точности детекции, чтобы выявить пределы устойчивости алгоритма.

Модель YOLOv11 – это одна из новейших разработок семейства алгоритмов «You Only Look Once», которая сочетает скорость и точность в задачах детекции объектов. Её популярность обусловлена универсальностью и способностью решать реальные задачи, где качество данных может быть нестабильным [2, 3].

Для изучения влияния шума на производительность модели была написана программа на языке Python, позволяющая накладывать различные виды шумов на изображения и видеоданные, в том числе аддитивный гауссов шум. В программе можно регулировать интенсивность шума в диапазоне от 0 до 100%. Также в разработанной программе можно рассчитать MSE и PSNR как для изображений, так и для видеоданных. На рис. 1 приведен интерфейс написанной программы.

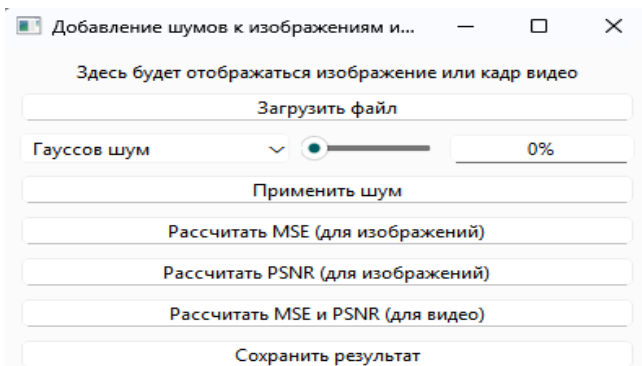


Рис. 1. Интерфейс программы для наложения шумов на изображения

Гауссов шум в эксперименте задавался с нулевым средним значением ($\mu = 0$) и дисперсией (σ^2), зависящей от заданного уровня интенсивности. В программе «100% интенсивность» для гауссова шума определяется стандартным отклонением σ или дисперсией σ^2 . Например, при интенсивности 100% $\sigma = 100$. Дисперсия (σ^2) – это квадрат стандартного отклонения. В данном случае если интенсивность 100, то $\sigma^2 = 100^2 = 10000$.

Интенсивность шума описывается через стандартное отклонение σ , определяющее степень его разброса. Шум накладывался на каждый кадр видеопоследовательности, что позволило оценить его влияние на данные в динамике.

Для анализа применялись три метрики: MSE (оценка степени искажений), PSNR (качество изображения) и точность модели (доля правильно распознанных объектов). Средние значения вычислялись для каждой интенсивности шума для получения репрезентативных данных.

Эксперимент включал несколько этапов. Исходным материалом стало видео с разрешением 1280×720 элементов, содержащее разнообразные объекты (например, человек, автомобиль, телефон). На первом этапе к кадрам добавлялся аддитивный гауссов шум с интенсивностью, регулируемой в диапазоне 10–90% с шагом 10%. Это имитировало реальные условия, в которых изображения могут подвергаться искажениям.

После подготовки зашумленных видеоданных для обработки использовалась зарегистрированная программа для ЭВМ [4]. Данная программа включает в себя модель YOLOv11, с помощью нее выводятся такие показатели, как средняя точность, быстродействие, а также показателный график точности, как показано на рис. 2.

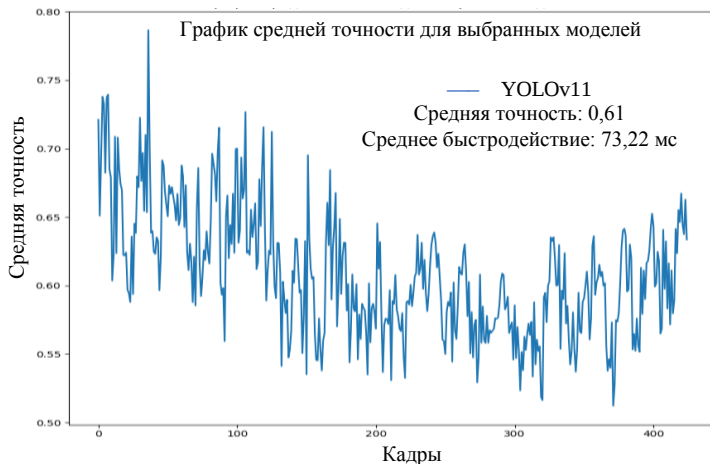


Рис. 2. Пример работы программы при обработке видео с наложением 10% шума

Проведённое исследование показало влияние гауссова шума на модель YOLOv11. При уровне шума 10–30% модель сохраняла высокую устойчивость, а точность оставалась неизменной. Средний MSE

при 30% шума составил 303,55, а PSNR – 23,32 дБ. Увеличение интенсивности шума привело к деградации качества изображений: возросли значения MSE и снизился PSNR. При 50% шума PSNR достиг критического уровня, после чего качество изображений резко ухудшилось. Точность YOLOv11 стремительно снижалась при уровнях шума выше 50%. Графики зависимости MSE, PSNR и точности распознавания от уровня шума приведены на рис. 3.

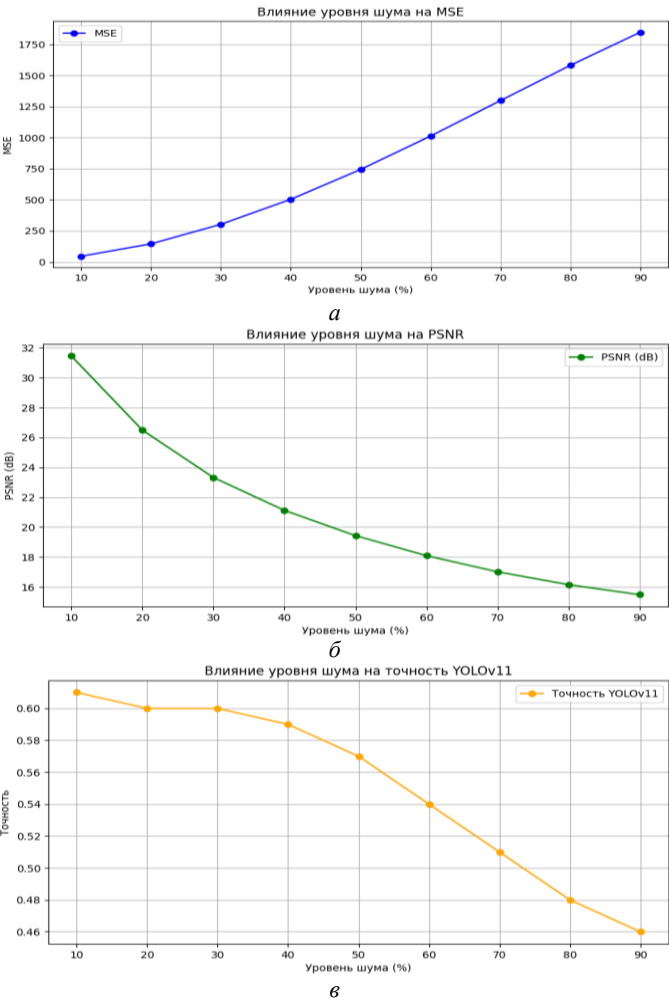


Рис. 3. Графики зависимости MSE (а), PSNR (б) и точности распознавания (в) от уровня шума

Графики продемонстрировали зависимость между уровнем шума, метриками качества изображений и точностью модели. MSE показал экспоненциальный рост, отражая усиление искажений, тогда как PSNR быстро снижался при увеличении интенсивности шума. Точность YOLOv11 оставалась стабильной до 50% шума, но резко падала при дальнейшем увеличении, указывая на критическую точку, после которой модель не справлялась с распознаванием.

Эксперимент подтвердил, что YOLOv11 имеет ограничения в условиях значительных искажений, что подчёркивает необходимость создания более устойчивых моделей. Перспективными направлениями могут стать интеграция адаптивных методов обработки шума и обучение на данных с высоким уровнем искажений.

Эти выводы подчеркивают текущие возможности YOLOv11 и открывают перспективы для дальнейших исследований и совершенствования архитектур для сложных условий ее эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gonzalez R. The Impact of Noise and Brightness on Object Detection Methods / R. Gonzalez, R. Woods // Journal of Computer Vision. – 2023. – Vol. 18, No. 2. – P. 45–58.
2. Zhang Z. DiffYOLO: Object Detection for Anti-Noise via YOLO and Diffusion Models / Z. Zhang, Y. Liu, H. Wang // Journal of Artificial Intelligence. – 2024. – Vol. 9, No. 2. – P. 34–47.
3. Chen H. Comprehensive Performance Evaluation of YOLOv11, YOLOv10, YOLOv9, YOLOv8, and YOLOv5 in Power Equipment Object Detection Tasks / H. Chen, J. Li, Y. Wang // Energy Journal. – 2024. – Vol. 20, No. 5. – P. 102–115.
4. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025614264. Программа для тестирования, сравнения и анализа моделей нейронных сетей / Г.Е. Эдель. – Заявка №2025612704. Дата поступления: 15 февраля 2025 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20 февраля 2025 г.

УДК 004.932.4

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ СОЗДАНИЯ И РЕДАКТИРОВАНИЯ ГРАФИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

И.В. Филимонов, студент каф. ТУ

*Научный руководитель А.В. Каменский, доцент каф. ТУ, к.т.н.
Проект ГПО ТУ-2002. Исследование и разработка методов анализа
и обработки фото- и видеоданных в телевизионных
измерительных системах
г. Томск, ТУСУР, iljafilimonov2004@gmail.com*

Представлены результаты разработки программного модуля для создания и редактирования графических элементов на растровых

изображениях с использованием фреймворка Qt на языке C++. Выполнен обзор методов работы с графикой в Qt, обоснован выбор QGraphics Framework. Описана архитектура модуля, включая интерактивное рисование, редактирование объектов и синхронное масштабирование. Проведено тестирование функциональности, подтвердившее корректность работы всех компонентов.

Ключевые слова: графический редактор, Qt, C++, QGraphics Framework, интерактивность, масштабирование, тестирование.

При создании графических приложений на Qt разработчики могут использовать два подхода: QPainter и QGraphics Framework.

QPainter предоставляет низкоуровневые функции для рисования примитивов (линий, фигур, текста) непосредственно на виджетах. Его преимущества – простота и высокая производительность для статичной графики. Однако отсутствие встроенной интерактивности (перемещение, масштабирование) усложняет реализацию динамических сцен.

QGraphics Framework предлагает высокоуровневую модель для работы с объектами (QGraphicsItem), поддерживающую интерактивность, группировку, трансформации и события мыши/клавиатуры. Он оптимизирован для работы с большим количеством элементов.

В таблице приведены сравнительные характеристики двух подходов по созданию графических приложений.

Сравнение методов

Характеристика	QPainter	QGraphics Framework
Интерактивность	Требуется ручная реализация	Встроенная поддержка
Управление элементами	Низкоуровневое	Объектно-ориентированное
Масштабирование/вращение	Ручная реализация	Встроенные функции
Производительность	Высокая для статики	Оптимальна для динамики

Для проекта выбран QGraphics Framework, так как он обеспечивает гибкость, интерактивность и удобство управления сложными сценами.

Модуль реализован по принципу многослойной архитектуры с использованием следующих компонентов:

1. TestWidget отображает фоновое изображение с поддержкой масштабирования.
2. DrawingWidget – прозрачный слой для рисования и редактирования элементов (линии, прямоугольники, текст) на основе QGraphicsView.

3. `ResizeHandle` и `Hand` – вспомогательные классы для изменения размеров и вращения объектов.

4. `SettingsWidget` – панель настройки стилей (цвет, толщина линий, размер шрифта).

5. `DrawingToolBar` – панель инструментов для выбора режима рисования.

Пример нарисованных объектов приведен на рис. 1.

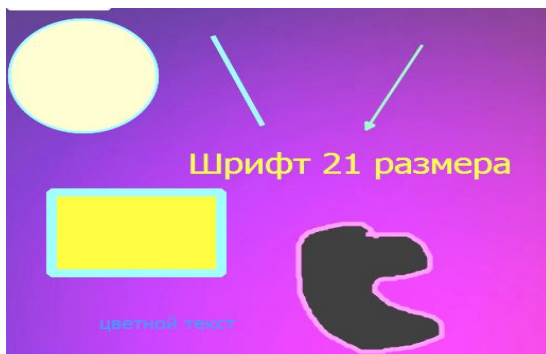


Рис. 1. Пример объектов

Взаимодействие компонентов:

- события мыши обрабатываются в `DrawingWidget`, где создаются объекты (`QGraphicsLineItem`, `QGraphicsRectItem`);

- изменение стилей через `SettingsWidget` передается через сигналы и слоты;

- фильтр событий в `MainWindow` синхронизирует масштабирование `TestViewWidget` и `DrawingWidget`.

Пример обработки рисования линии:

```
void DrawingWidget::drawingStart(const QPointF& pos) {
    currentItem = new QGraphicsLineItem();
    scene()->addItem(currentItem);
    startPos = pos;
}

void DrawingWidget::updateLine(const QPointF& pos) {
    auto line = static_cast<QGraphicsLineItem*>(currentItem);
    line->setLine(QLineF(startPos, pos));
}
```

Тестирование включало проверку следующих возможностей:

1. Рисование элементов: все примитивы (линии, эллипсы, текст) корректно отображаются и сохраняют параметры стилей.

2. Редактирование объектов:

- изменение размеров через ResizeHandle.
- вращение с помощью Hand.

3. Синхронное масштабирование: одновременное изменение масштаба фонового изображения и графических элементов.

Результаты тестирования:

- все элементы изменяют размеры и положение без артефактов;
- стили (цвет, толщина) применяются мгновенно;
- масштабирование работает плавно при уровне зума от 10 до 500%.

Разработанный модуль демонстрирует эффективность использования QGraphics Framework для создания интерактивных графических редакторов. Реализованные функции рисования, редактирования и масштабирования соответствуют современным требованиям. Перспективы развития включают добавление новых инструментов (кривые Безье, градиенты) и оптимизацию для работы с 3D-графикой.

ЛИТЕРАТУРА

1. QPainter Class | Qt GUI 6.8.2 [Электронный ресурс]: официальный сайт QT. – URL: <https://doc.qt.io/qt-6/qpainter.html> (дата обращения: 14.02.2025).
2. Иванов А.С. Основы объектно-ориентированного программирования в C++. – СПб.: Питер, 2017. – 800 с.
3. Сигналы и слоты в Qt / Хабр [Электронный ресурс]: сайт тематических коллективных блогов. – URL: <https://habr.com/ru/articles/50812/> (дата обращения: 17.02.2025).

УДК 004.932.2

ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО МАНИПУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА MIDAS

Саура, А.А. Тисленко, аспиранты каф. КСУП и ТУ;

В.В. Капустин, доцент каф. ТУ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, sairasanawar@gmail.com

Представлена оценка точности определения траектории движения рабочего органа шестиосевого робота-манипулятора с использованием нейронной сети MiDas и алгоритма отслеживания Kernelized Correlation Filter (KCF). Движение рабочего органа было описано, разработанной с использованием метода Денавита–Хартенберга, кинематической схемы шести осевого роботизированного манипулятора серии АВВ. Данное исследование позволяет оценить эффективность применения нейронной сети MiDas и алгоритма компью-

терного зрения KCF в качестве инструмента оптической обратной связи для задач позиционирования рабочего органа.

Ключевые слова: нейронные сети, робот-манипулятор, параметры Денавита–Хартенберга, прямая задача кинематики, шестиосевой робот-манипулятор, алгоритм MiDas, алгоритм KCF, компьютерное зрение.

Появление индустрии 4.0 произвело революцию в промышленном производстве, и роботизированные манипуляторы стали ключевыми факторами автоматизации в таких секторах, как производство, здравоохранение и опасные среды [1]. Роботизированная автоматизация повысила производительность и сократила рабочую нагрузку [2]. Современные роботизированные манипуляторы используются в таких областях, как хирургия [3], освоение космоса [4] и лабораторные исследования [5], где точность и надежность имеют решающее значение.

Исследования роботизированных манипуляторов привели к различным инновациям, включая управляемые Arduino-манипуляторы для выбора и размещения объектов [6], стратегии адаптивного управления упругими приводами [7] и виртуальные платформы для управления роботизированными манипуляторами [8]. В данном исследовании предлагается инновационный подход с использованием прямой кинематики в сочетании с микроконтроллерами Jetson Nano и Arduino Nano.

Используемые методы. На рис. 1 показана система, включающая Jetson Nano (ведущее устройство) и Arduino Nano (ведомое устройство), камеру и восемь сервоприводов (далее – суставы). Jetson Nano отправляет команды по UART на Arduino Nano, управляя суставами для выбора и размещения объектов. Камера транслирует изображение рабочего органа (РО), а нейронная сеть предоставляет координаты движения захвата (x , y , z) и точки траектории.

Авторами была создана 3D-CAD-модель существующей роботизированной руки с помощью SolidWorks (рис. 2, 3). CAD-модель позволила получить значения параметров Денавита–Хартенберга (ДХ) с высокой точностью при сохранении целостности физического оригинала.

Определив параметры ДХ и построив систему локальных координат, точкой интереса которой является РО, были подобраны крайние положения РО задаваемой траектории при соответствующих углах поворота суставов, полученных посредством моделирования разработанной кинематической схемы в Matlab Robot Toolbox.

Результаты. На рис. 4 приведена траектория движения РО, полученная с использованием нейронной сети MiDas и KCF. Красными маркерами обозначены точки, координаты отражают конечные положения наблюдаемой траектории.

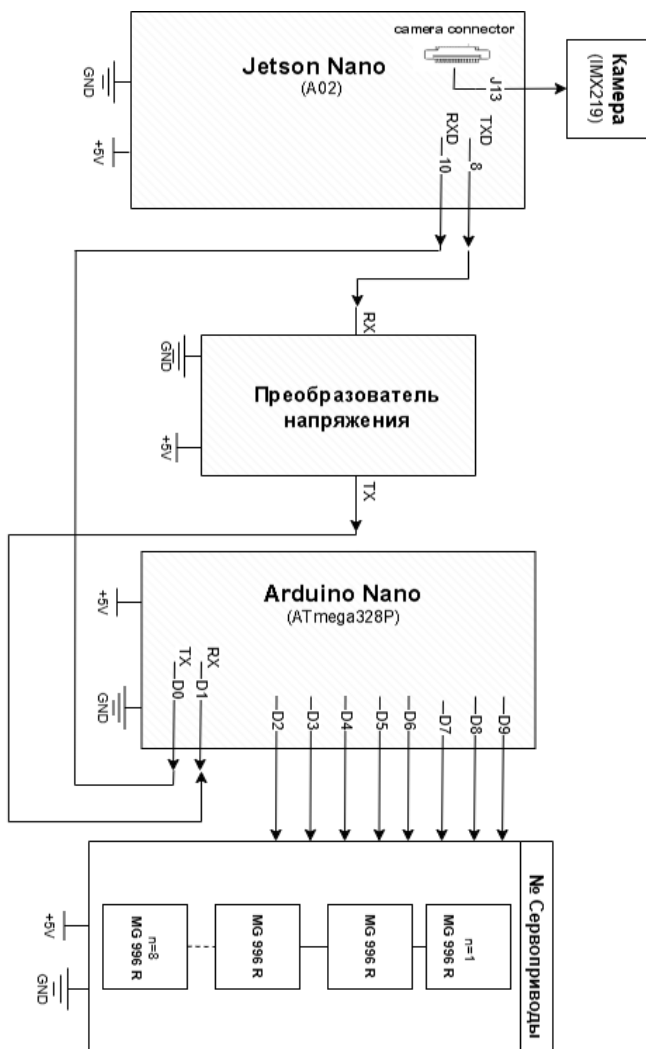


Рис. 1. Функциональная схема разрабатываемой установки

Согласно полученным в результате моделирования с использованием MiDas для оценки глубины и KFC для отслеживания значений координат конечных положений заданной траектории, были вычислены разности координат (x , y , z), т.е. их линейное смещение. Также были получены линейные смещения по идентичным точкам траектории, построенные нейронной сетью.

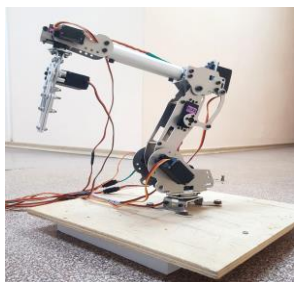


Рис. 2. Промышленный робот ABB

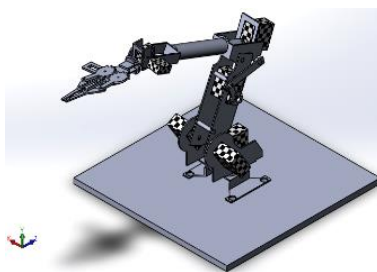


Рис. 3. Модель робота в SolidWorks

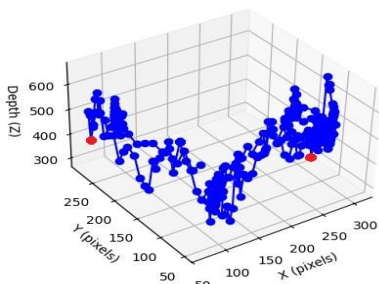


Рис. 4. Траектория движения РО

Вычисление погрешности определения координат произведено с использованием следующего выражения:

$$\Delta X_{\text{проц}} = \frac{|\Delta X_p - \Delta X_k|}{|\Delta X_p|} \cdot 100\% = \frac{\|x_{p2} - x_{p1}\| - \|x_{k2} - x_{k1}\|}{\|x_{p2} - x_{p1}\|} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где ΔX_p – линейное смещение по оси X в системе координат, привязанной к роботу; ΔX_k – линейное смещение по оси X в системе координат камеры.

Аналогично (1) вычисляются погрешности определения координат конечных положений траектории движения РО по изображениям, содержащим информацию о движении робота, для осей Y и Z .

Заключение. В результате работы было установлено, что погрешности определения координат x и y в целом составляют 15% от значений, полученных в ходе моделирования. Погрешность определения координаты z составила менее 0,1%. Значительный вклад в погрешности определения x и y вносят флуктуации движения РО из-за несовершенства конструкции робота, а также эффективность алгоритма слежения за РО KCF на изображении. Исследуемая нейронная

сеть показывает высокую эффективность в определении координат, но требует незначительной доработки в отношении алгоритма отслеживания.

ЛИТЕРАТУРА

1. In-Depth Review of Advanced Control Strategies and Cutting-Edge Trends in Robot Manipulators: Analyzing the Latest Developments and Techniques / I. Sherif et al. // IEEE Access. – 2024. – Vol. 12. – P. 47672–47701. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3383782.
2. Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach / G. Michalos et al. // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2010. – Vol. 2, No. 2. – P. 81–91. DOI: 10.1016/j.cirpj.2009.12.001.
3. Robot-Assisted Minimally Invasive Surgery–Surgical Robotics in the Data Age / T. Haidegger et al. // Proceedings of the IEEE. – 2022. – Vol. 110, No. 7. – P. 835–846. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3180350.
4. Space Robot Mechanics and Control / Yoshida, K. et al. // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 2012. – Vol. 16, № 4. – P. 20–28. DOI: 10.1109/MRA.2009.934818.
5. Tri-Co Robot: a Chinese robotic research initiative for enhanced robot interaction capabilities / D. Han et al. // National Science Review. – 2017. – Vol. 5, No. 6. – P. 799–801. DOI: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx148>.
6. Pick and place robotic arm implementation using Arduino / A. Baby et al. // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2017. – Vol. 12, No. 2. – P. 38–41. DOI: 10.9790/1676-1202033841.
7. Tuan M.T. A Novel Adaptive Sliding Mode Controller for a 2-DOF Elastic Robotic Arm / M.T. Tuan, F. Sanfilippo, V.H. Nguyen // IEEE 19th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – Kristiansand: Norway, 2022. – Vol. 11. – P. 1–24. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics11020047>.
8. Qassem M.A. Modeling and Simulation of 5 DOF educational robot arm / M.A. Qassem, I. Abuhadrous, H. Elaydi // 2nd International Conference on Advanced Computer Control. – Shenyang: China, 2010. – Vol. 5. – P. 569–574. DOI: 10.1109/ICACC.2010.5487136.

УДК 004.6

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ И ИНТЕРФЕЙСА УПРАВЛЕНИЯ БАЗОЙ ДАННЫХ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ 3D-ВИДЕОДАНЫХ ЭНДОСКОПИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

***Н.Б. Казаков, магистрант ПИШ, А.А. Филимонцева, магистрант
каф. УИ; А.В. Каменский, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, kazakov.n.b@yandex.ru***

Работа посвящена разработке системы идентификации пользователей и модуля управления базой данных «VEOmigration», предна-

значенного для хранения 3D-видеоданных эндоскопических операций, сочетающих криптографические методы защиты с интуитивно понятным интерфейсом.

Ключевые слова: база данных, медицинские данные, эндоскопические операции, PyQt5, SHA-256, солевой хэш, интерфейс пользователя, загрузка данных, безопасность данных.

Современные эндоскопические процедуры генерируют объемные 3D-видеоданные, требующие специализированных решений для архивации и анализа. Существующие системы, например PACS [1], ориентированы на статичные 2D-изображения и не поддерживают 3D-форматы, что ограничивает их применение в динамических хирургических исследованиях. Базы данных общего назначения также недостаточно адаптированы для медицинских задач: отсутствие предустановленных параметров этапов операций и слабая интеграция криптографических методов снижают их эффективность.

Аналоги, такие как DICOM-совместимые системы и NoSQL-решения, не решают проблему работы с 3D-видеоданными и структурированием метаданных. Специализированные хирургические платформы фокусируются на симуляциях, игнорируя задачи хранения данных.

Цель работы – создать модуль, ориентированный на решение задач безопасного хранения 3D-видеоматериалов эндоскопических операций и включающий в себя систему идентификации пользователей, защищенную криптографическими алгоритмами, и интерфейсы для загрузки и анализа данных.

В модуле «VEOMigration» [2] использованы такие современные технологии, как PyQt5, SHA-256, солевой хэш и SQL базы данных. Приведем краткое описание каждой из них.

1. Для реализации интуитивного интерфейса выбрана библиотека PyQt5, обеспечивающая кроссплатформенную совместимость и интеграцию с медицинским оборудованием [3].

2. SHA-256 [4] – это криптографический алгоритм для хеширования и паролей, обеспечивающий защиту от несанкционированного доступа.

3. Солевой хэш [5] – это дополнительный уровень безопасности, предотвращающий атаки перебором.

4. Хранение данных организовано на основе реляционной SQL-модели, что позволяет связывать видеофайлы с параметрами операций через внешние ключи [6].

Процесс аутентификации включает проверку введенных логина и пароля на соответствие данным, хранящимся в базе. Для защиты па-

ролей применяется комбинированный подход, хэширование SHA-256 дополняется динамически генерируемой «солью», что исключает использование «радужных таблиц» в атаках. Система выполняет следующие действия:

1. Проверяет наличие пользователя в базе данных, фрагмент кода представлен на рис. 1.
2. Сравнивает хэш введенного пароля с сохраненным значением.
3. При успешной проверке предоставляет доступ к интерфейсу базы данных.
4. В случае ошибки выводит сообщение «Неверный пароль» или «Пользователь не найден».

```
def attemptLogin(self):
    username = self.usernameLineEdit.text()
    password = self.passwordLineEdit.text()

    if username in self.users:
        salt = self.users[username]['salt']
        key = self.users[username]['key']
        new_key = hashlib.pbkdf2_hmac('sha256', password.encode('utf-8'), salt, 100000)

        if key == new_key:
            QMessageBox.information(self, "Login", "Welcome,
{!}".format(username))
            self.loggedIn.emit()
            self.hide()
            ui_file = QFile("windowafterauthorization.ui")
            ui_file.open(QFile.ReadOnly)
            self.loaded_ui = loadUi(ui_file)
            ui_file.close()
            self.loaded_ui.show()
        else:
            QMessageBox.warning(self, "Login", "Invalid username or
password.")
    else:
        QMessageBox.warning(self, "Login", "User not found.")
```

Рис. 1. Алгоритм проверки вводимых данных

Разработан и согласован с БГМУ (г. Уфа) интерфейс пользователя, который позволяет загружать данные о проведенной операции на сервер и систематизировать информацию при помощи созданной базы данных.

Интерфейс разработан для систематизации информации об эндоскопических операциях и включает ввод основных параметров операции, таких как дата, тип операции, орган и уникальный идентификатор пациента (UID). Кроме того, предусмотрены поля для указания имени хирурга и клиники, где проводилась операция. Для детализа-

ции хода операции интерфейс позволяет выбирать этапы из 17 установленных вариантов, что минимизирует ошибки ручного ввода, а также указывать время начала и окончания каждого этапа в формате Ч:ММ:СС. На каждом этапе фиксируется объем кровопотери, что обеспечивает точность учета данных в реальном времени.

После заполнения информации система поддерживает загрузку видеофайлов в форматах 2D или 3D, что показано на рис. 2, а завершается процесс отправкой всех данных на сервер через кнопку «Загрузка», что обеспечивает структурированное хранение информации в базе данных.

Выберете файл

Выбор файла //192.168.210.188/all/БашГМУ/1-Простатэктомия/Операция №139 от 20.09.2024 on1 без титров/2024-09-20 07-54-08 kanal-1.mp4

☒ Загрузка видео в двухканальном режиме

Выбор файла //192.168.210.188/all/БашГМУ/1-Простатэктомия/Операция №139 от 20.09.2024 on1 без титров/2024-09-20 07-54-08 kanal-2.mp4

Загрузка

Загрузка

Рис. 2. Фрагмент меню загрузки данных

Администратор может отслеживать процесс загрузки через серверный интерфейс.

Таким образом, модуль «VEOmigration» представляет собой комплексное решение для безопасного хранения и систематизации 3D-видеоданных эндоскопических операций, сочетающее криптографические методы защиты с интуитивно понятным интерфейсом. Внедрение предустановленных параметров минимизирует ошибки ручного ввода, а использование реляционной SQL-модели позволяет устанавливать связи между видеоархивами и метаданными операций через механизм внешних ключей. Реализованная система аутентификации и разграничения прав доступа гарантирует конфиденциальность медицинских данных, что подтверждено внедрением программного модуля в клинике БГМУ (г. Уфа).

ЛИТЕРАТУРА

1. PACS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/PACS>, свободный (дата обращения: 25.02.2025).
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664405 «VEOmigration: 3D-видеоданные эндоскопических операций». Авторы: Н. Бородина, А.А. Филимонцева, А.В. Каменский. Заявка № 2024663255. Дата поступления 11 июня 2024 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20.06.2024 г.

3. PyQt5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://build-system.fman.io/pyqt5-tutorial>, свободный (дата обращения: 25.02.2025).

4. SHA-256 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/729260/>, свободный (дата обращения: 25.02.2025).

5. Солевой хэш [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gist.github.com/codedokode/9576319>, свободный (дата обращения: 25.02.2025).

6. SQL базы данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://azure.microsoft.com/ru-ru/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-sql-database>, свободный (дата обращения: 25.02.2025).

УДК 004.932.4

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ ДЛЯ ИХ СОКРЫТИЯ

И.Д. Колесников, студент

*Научный руководитель И.Д. Мусихин, ассистент каф. ТУ
Проект ГПО ТУ-2501. Разработка нейросетевых алгоритмов
для систем технического зрения с использованием цифровых
двойников объектов интереса
г. Томск, ТУСУР, ik@amdcloud.kz*

Представлены разработка и реализация алгоритмов распознавания лиц с последующим применением к ним различных фильтров. Реализация алгоритма проводилась на языке программирования C++ с его последующей интеграцией в DiViLab.

Ключевые слова: C++, OpenCV, распознавание лиц, размытие Гаусса, пикселизация, размытие в движении, DiViLab.

Распознавание лиц – одно из важных направлений в области искусственного интеллекта и компьютерного зрения. Алгоритмы применяются в системах контроля доступа, видеонаблюдения, аутентификации пользователей, мобильных редакторах фотографий и в медицине для диагностики по изображениям. Цель работы – выполнение реализации алгоритма распознавания лиц.

В качестве исходных данных были взяты видеофайлы: видеоматериала блогера LinusTechTips и интервью с Killian Murphe. Написание фильтров производилось на языке C++. Обработка происходила в приложении DiViLab. Применение разработанного фильтра осуществляется через приложение, предоставляемое видеолaborаторией DiViLab.

Распознавание лиц – это процесс автоматического анализа и идентификации лиц на изображениях или видео с использованием алгоритмов компьютерного зрения и методов машинного обучения.

Алгоритм был разработан на основе методов, представленных в библиотеке OpenCV на языке программирования C++. Процесс начинается с использования каскадных классификаторов для обнаружения лиц [1]. Перед обнаружением лиц изображения конвертируются в градации серого, чтобы снизить влияние цвета и ускорить вычисления. Также применяется выравнивание гистограммы для улучшения контрастности. Масштабирование изображения позволяет уменьшить нагрузку на процессор и ускорить процесс обработки, особенно в реальном времени.

Детекторы в OpenCV используют алгоритмы для анализа изображений на разных масштабах, что обеспечивает надежное обнаружение лиц независимо от их размеров и положения в кадре.

Для анализа используются алгоритмы, преобразующие изображение в более компактное представление, которое затем служит основой для дальнейшего анализа или классификации [2, 3].

Заключительным этапом является, например, применение фильтров для обработки лиц. После обнаружения области лица выделяются в виде региона интереса (ROI) [4], и к ним применимы такие фильтры, как:

- размытие Гаусса, создающее размытый эффект, который контролируется за счет изменения размера ядра [5, 6];
- пикселизация, уменьшающая разрешение изображения, чтобы скрыть детали [7];
- размытие в движении, симулирующее динамическое размытие для дополнительной анонимизации [1, 8].

Для использования разработанного алгоритма в DiViLab необходимо загрузить видеоматериал и выполнить импорт созданного фильма. После этого видеоматериал становится доступным для обработки.

В ПО задается количество кадров для обработки и настраиваются параметры фильтрации, включая выбор одного из трех методов обработки и задание размера ядра. Для размера ядра применяются лишь положительные значения и значения до 100.

По завершении обработки приложение предоставляет исходный видеоматериал, а также его модифицированную версию, в которой к кадрам применён выбранный фильтр. Оба видеоматериала можно воспроизвести для сравнения результатов и анализа эффективности фильтра. Обработанные кадры видеоматериала (рис. 1) показывают результаты применения размытия Гаусса, пикселизации и размытия в движении к распознанным областям лиц. Также для сравнения приведено исходное изображение (см. рис. 1, а) без какой-либо обработки.

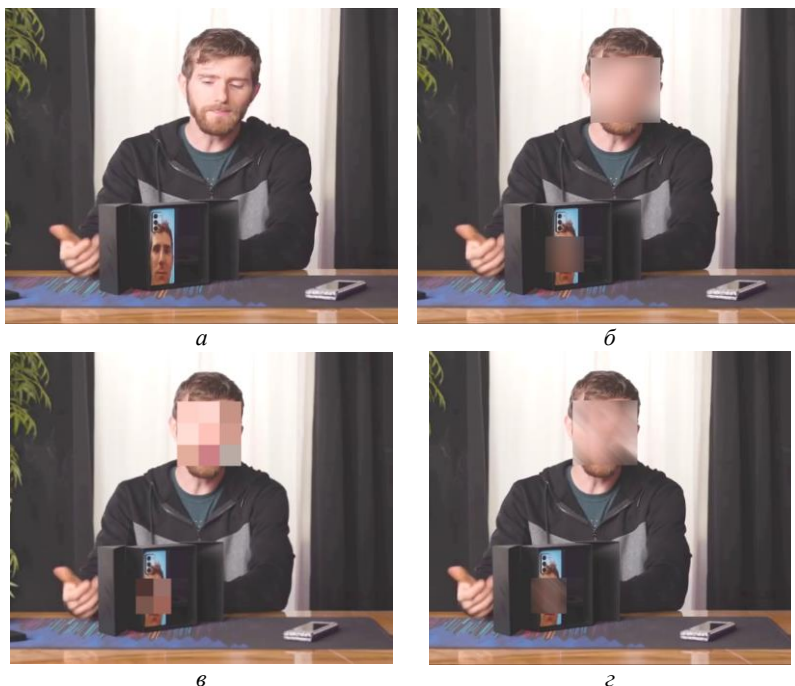


Рис. 1. Применение фильтров на видеоматериале № 1:
а – исходный кадр видеоматериала; *б* – кадр видеоматериала с применением фильтра размытия Гаусса, размер ядра – 30; *в* – кадр видеоматериала с применением фильтра пикселизации, размер ядра – 50; *г* – кадр видеоматериала с применением фильтра размытия в движении, размер ядра – 100

В процессе выполнения работы было замечено влияние настроек для размера ядра. Эффект фильтров отличается в зависимости от выбранных параметров. Размытие Гаусса с размером ядра 30 (см. рис. 1, *б*) создаёт эффект сглаживания, который скрывает черты лица, но при этом сохраняет общий контур. Пикселизация с параметром 50 (см. рис. 1, *в*) трансформирует лица в крупные квадратные элементы и полностью скрывает детали. Размытие в движении с параметром 100 (см. рис. 1, *г*) демонстрирует резкий эффект, при котором лицо растягивается вдоль направления движения, делая его абсолютно неразборчивым.

В данных примерах демонстрируется работа алгоритмов обнаружения лиц и применения фильтров. Исходное изображение служит базой для обработки, а выбранный фильтр с заданными настройками применяется исключительно к обнаруженным лицам.

Эффективность фильтров очень зависит от настроек размера ядра, что позволяет добиться желаемого результата, например, от частичного размытия обнаруженного лица до полного размытия, делая черты лица совершенно неразборчивыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. OpenCV Cascade Classifier [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.opencv.org/3.4/db/d28/tutorial_cascade_classifier.html, свободный (дата обращения: 06.03.2025).

2. Geometric Image Transformations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.opencv.org/4.x/da/d54/group_imgproc_transform.html, свободный (дата обращения: 06.03.2025).

3. OpenCV pixelate algorithm [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stackoverflow.com/questions/33072603/opencv-pixelate-algorithm> (дата обращения: 13.12.2024).

4. OpenCV pixelate algorithm [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stackoverflow.com/questions/33072603/opencv-pixelate-algorithm> (дата обращения: 13.12.2024).

5. OpenCV Filter Functions Documentations [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.opencv.org/4.x/d4/d86/group_imgproc_filter.html, свободный (дата обращения: 06.03.2025).

6. Gaussian Blur and Filtering Techniques [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://learnopencv.com/gaussian-blur>, свободный (дата обращения: 06.03.2025).

7. OpenCV pixelate algorithm [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stackoverflow.com/questions/33072603/opencv-pixelate-algorithm> (дата обращения: 13.12.2024).

8. OpenCV how to add motion blur effects to the whole image [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stackoverflow.com/questions/40817634/opencv-how-to-add-artificial-smudge-motion-blur-effects-to-a-whole-image>, свободный (дата обращения: 06.03.2025).

УДК 004.932.4

ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ ПОДАВЛЕНИЯ ШУМОВ НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

П.В. Кудрявцев, студент

*Научный руководитель И.Д. Мусихин, ассистент каф. ТУ
Проект ГПО ТУ-2501. Разработка нейросетевых алгоритмов
для систем технического зрения с использованием цифровых
двойников объектов интереса
г. Томск, ТУСУР, angel5oli2805@gmail.com*

Разработаны два фильтра для обработки изображений и проведено сравнение результатов их работы. Фильтр Гаусса, его основное

преимущество заключается в способности сохранять контуры при уменьшении высокочастотного шума, что делает его эффективным при работе с изображениями, где важна четкость деталей. Медианный фильтр, в свою очередь, лучше подходит для удаления импульсного шума. Он работает, заменяя каждый пиксель значением медианы пикселей в окне фильтра. Это позволяет сохранять края, избегая размытия, что особенно важно в медицинской визуализации и других областях, требующих точности обработки видеоданных.

Ключевые слова: фильтр Гаусса, медианный фильтр, устранение шума, обработка изображений.

Целью работы является исследование способов подавления шумов на цифровых изображениях. Задачи работы: программная реализация медианной фильтрации и фильтра Гаусса; улучшение качества тестовых изображений медианной фильтрацией и фильтром Гаусса и оценка качества полученных изображений.

Метод медианной фильтрации основывается на замене значения каждого пикселя на медиану значений в его окрестности (обычно квадратной области фиксированного размера) [1]. Фильтр Гаусса представляет собой фильтр, который работает на основе использования свертки изображения с гауссовым ядром [2].

В данной работе были реализованы два фильтра: медианный фильтр и фильтр Гаусса на языке программирования C++. Реализация фильтров осуществлялась в рамках цифровой видеолaborатории DiViLab. Программа для сравнения некоторых метрик изображений написана на языке программирования Python. Для написания кода использовался IDLE [3].

Оба фильтра были протестированы на изображении с разным ядром использования фильтра, получившиеся в результате изображения показаны на рис. 1 и 2.

Измерения были проведены с помощью программы, написанной на языке программирования Python. Код позволяет рассчитать следующие характеристики: пиковое отношение сигнала к шуму (ПОСШ), среднеквадратичное отклонение (СКО) и средний контраст. Результаты измерений представлены в табл. 1–3 [4].

Оценка качества полученных изображений показала, что выбранные методы существенно влияют на визуальное восприятие и общий уровень их четкости. В результате выполненной работы подтверждена важность применения фильтрации для достижения наилучших результатов при обработке цифровых изображений.

Результаты показали, что в данном случае фильтр Гаусса справился с обработкой изображения лучше, чем медианный фильтр, но так как значения ПОСШ в диапазоне от 28 до 30 считаются нормой, а

значения среднеквадратического отклонения и среднего контраста фильтров в ходе сравнения были больше 70, подтверждает то, что оба фильтра успешно справились с улучшением изображения.

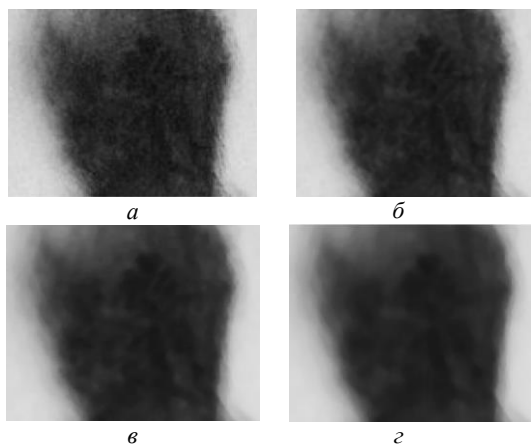


Рис. 1. Применение медианного фильтра: *a* – изображение до фильтрации; *б* – изображение после фильтрации с ядром 3×3 ; *в* – изображение после фильтрации с ядром 5×5 ; *г* – изображение после фильтрации с ядром 7×7

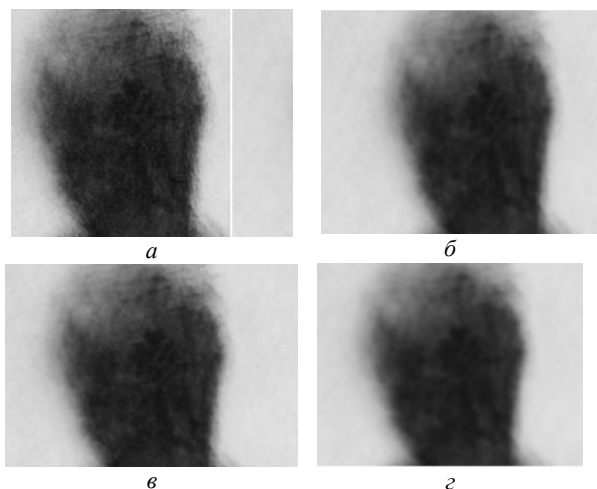


Рис. 2. Применение фильтра Гаусса:
a – изображение до фильтрации; *б* – изображение после фильтрации с ядром 3×3 ; *в* – изображение после фильтрации с ядром 5×5 ; *г* – изображение после фильтрации с ядром 7×7

Таблица 1

Сравнение полученных отношений сигнала к шуму

Фильтр Гаусса		Медианный фильтр	
Ядро фильтра	ПОСШ, дБ	Ядро фильтра	ПОСШ, дБ
3×3	30,48	3×3	28,54
5×5	30,44	5×5	28,57
7×7	30,52	7×7	28,56

Таблица 2

Сравнение полученных среднеквадратических отклонений

Фильтр Гаусса		Медианный фильтр	
Ядро фильтра	СКО	Ядро фильтра	СКО
3×3	77,49	3×3	70,48
5×5	77,35	5×5	70,6
7×7	77,09	7×7	70,65

Таблица 3

Сравнение полученных средних контрастов

Фильтр Гаусса		Медианный фильтр	
Ядро фильтра	Средний контраст	Ядро фильтра	Средний контраст
3×3	77,49	3×3	70,48
5×5	77,35	5×5	70,61
7×7	77,09	7×7	70,65

ЛИТЕРАТУРА

1. Медианный фильтр низкочастотного и высокочастотного прохождения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pergam.ru/press/blogs>, свободный (дата обращения: 11.03.2025).

2. Gaussian Blur and Filtering Techniques [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://learnopencv.com/gaussian-blur>, свободный (дата обращения: 11.03.2025).

3. OpenCV Filter Functions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.opencv.org/4.x/d4/d86/group_imgproc_filter.html, свободный (дата обращения: 11.03.2025).

4. Сравнение объективных методов оценки качества цифровых изображений / А.В. Кокошкин, В.А. Коротков, К.В. Коротков, Е.П. Новичихин // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 6. – С. 17–18.

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ЛАБОРАТОРНОГО
ПРАКТИКУМА ПО ИЗУЧЕНИЮ МОДЕЛЕЙ ШУМОВ И
СПОСОБОВ ИХ ПОДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДИСЦИПЛИНЫ
«ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ»**

К.С. Куприянова, студентка

*Научный руководитель А.В. Каменский, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, TUCVP, kuprianovak8@gmail.com*

Представлено решение наполнения лабораторного практикума по дисциплине «Видеоинформационные системы». Разрабатываемый лабораторный практикум предполагает изучение студентом моделей шумов и их влияние на изображения, а также методы их подавления. В ходе выполнения лабораторных работ для обработки изображений будут использоваться разработанные в данной работе элементы. Разработка элементов осуществляется в среде MatLab.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, устранение шумов, фильтрация в частотной области, медианная фильтрация, импульсный шум, периодический шум, гауссов шум, лабораторный практикум.

Устранение шумов и повышение качества изображений является актуальной задачей в области обработки изображений и в видеоинформационных системах. Качество изображений является ключевым фактором в видеоинформационных системах, а появление шумов и различного вида помех значительно ухудшает восприятие и скорость обработки данных. Для достижения таких целей, как обработка и анализ изображений, видеопотоков в режиме реального времени и др., необходима подготовка квалифицированных специалистов.

Целью данной работы является создание набора инструментов и методик для обучения студентов анализу моделей шумов и методов их устранения в рамках лабораторных занятий по дисциплине «Видеоинформационные системы». В качестве среды разработки выбран MatLab, что обусловлено его широкими возможностями в области обработки изображений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: реализация моделей шумов, реализация методов подавления шумов, разработка лабораторных заданий и реализация вспомогательных элементов в среде MatLab.

В качестве изучаемых моделей шумов будут использоваться гауссов, импульсный и периодический шумы.

Гауссов шум, также известный как гауссов белый шум, является разновидностью статистического шума, характеризующегося функци-

ей плотности вероятности нормального распределения. Он стал разновидностью белого шума, который представляет собой случайный сигнал, содержащий частоты равной мощности. Этот тип шума возникает вследствие тепловых флуктуаций в электронных компонентах, таких как датчики видеокамеры или усилители сигнала [1].

Импульсный шум представляет собой случайные изолированные точки на изображении, значение которых сильно отличается от значений соседних точек (часто возникает при передаче через аналоговые каналы). Данный шум проявляется в замене некоторых случайно расположенных пикселей изображения на шумовые импульсы. Их величина может быть либо случайным значением из определенного непрерывного диапазона, либо принимать ряд дискретных значений [2].

Периодический шум весьма типичен для оцифрованных изображений. Изображение, подверженное периодическому шуму, будет выглядеть так, как будто поверх исходного изображения добавлен повторяющийся рисунок. В частотной области этот тип шума можно рассматривать как дискретные всплески.

В качестве методов подавления шумов используются методы линейной и нелинейной фильтрации, такие как усредняющий фильтр, медианный фильтр и фильтрация в частотной области [3].

К методам линейной фильтрации относится усредняющий фильтр, он заменяет значение каждого пикселя на среднее значение соседних пикселей. Это означает, что все соседние пиксели должны вносить одинаковый вклад в результирующее значение. Поэтому веса в маске усредняющего фильтра должны быть равны.

К методам нелинейной фильтрации относится медианный фильтр. Данный фильтр использует скользящее окно w , которое перемещается по полю изображения и охватывает нечетное количество пикселей. Центральный пиксель в окне заменяется медианой всех значений пикселей изображения, попавших в это окно.

Частотная фильтрация, в свою очередь, работает в частотной области, преобразуя изображение из пространственной области в частотную с помощью преобразования Фурье. Такой подход позволяет устранять или усиливать определенные частотные составляющие изображения, которые связаны с шумом или деталями [4].

Данные методы фильтрации могут быть легко и быстро реализованы в среде MatLab благодаря встроенным инструментам для работы с изображениями, что делает их удобными для использования в лабораторном практикуме.

Алгоритм разрабатываемой программы, который включает в себя реализованные элементы, представлен на рис. 1.

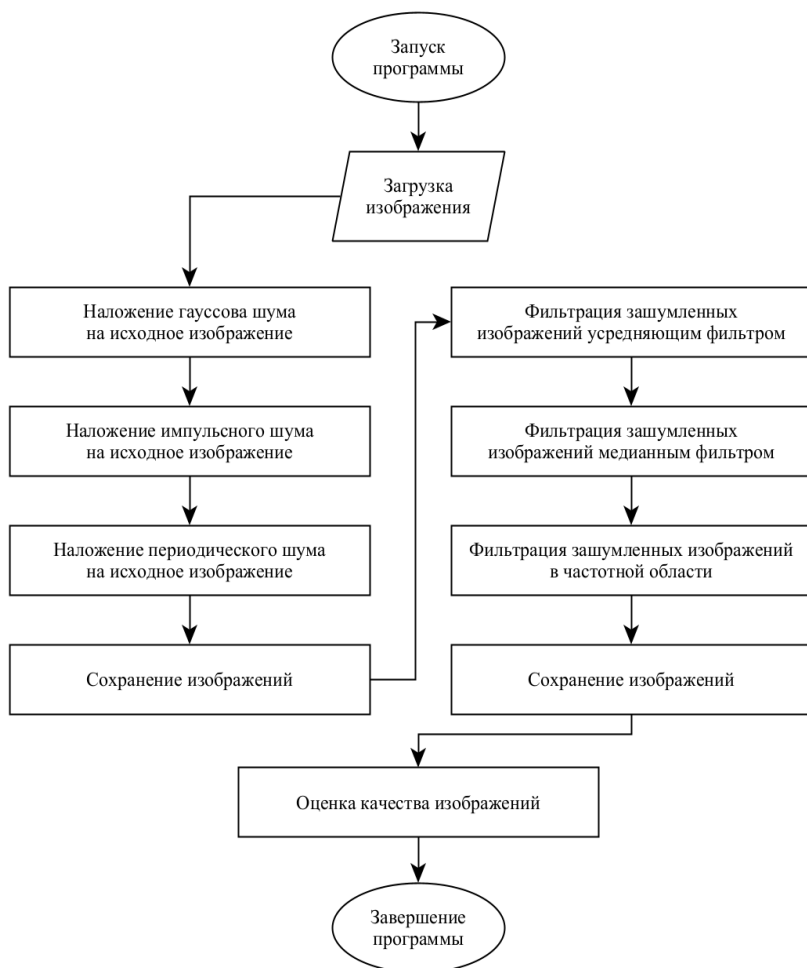


Рис. 1. Алгоритм программы

Для выполнения лабораторного практикума студентам предлагается выполнить ряд заданий. Перед началом работы выдается определенное тестовое изображение. Первое задание включает в себя: наложение шумов на изображение, изучение влияния изменяемых входных параметров разработанных функций шумов, а также сохранение зашумленных изображений.

Следующий этап заключается в фильтрации изображений, устранении разного рода шумов и помех. В процессе фильтрации изобра-

жений студентом изменяются параметры фильтров и производится визуальная оценка влияния изменяемых параметров на качество изображений.

Следующим этапом является количественная оценка обработанных изображений. Для этого используются методы эталонной оценки качества изображений [5]. Чтобы провести оценку качества обработанных изображений, реализованы такие методы, как пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ), среднее квадратическое отклонение (СКО), среднеквадратичная ошибка или RMSE (Root Mean Square Error), индекс структурного сходства, или SSIM (structure similarity).

Разработанные элементы лабораторного практикума обеспечивают возможность практического применения теоретических знаний. По результатам выполнения лабораторных работ студенты смогут самостоятельно применять различные фильтры и анализировать их влияние на изображения, а также сравнивать эффективность применения фильтров для различных типов шумов, что способствует пониманию ограничений каждого из методов обработки изображений.

Элементы лабораторного практикума разработаны по модульному принципу, что позволяет в дальнейшем адаптировать задания под различные уровни подготовки студентов. На начальном этапе студенты могут работать с готовыми функциями обработки изображений в MATLAB. На более продвинутом уровне студенты могут самостоятельно реализовывать алгоритмы фильтрации, что способствует более глубокому изучению области цифровой обработки изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гауссов шум [Электронный ресурс]: платформа ресурсов по информатике. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/gaussian-noise/> (дата обращения: 25.02.2025).
2. Kondo K. Efficient fixed-valued and random-valued impulse detection for accurate image restoration / K. Kondo, M. Haseyama, H. Kitajima // Proc. of the 3rd international symposium on image and signal processing and analysis (ISPA'03), 2003. – Vol. 2. – P. 1009–1012.
3. Гошин Е.В. Метод фильтрации шумов на изображениях в пространстве разреженных представлений / Е.В. Гошин, Д.В. Архипова // Компьютерная оптика. – 2024. – Т. 48, № 3. – С. 432–438. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1412.
4. Сафонов А.А. Подавление шумов на изображениях с использованием пространственной и частотной фильтрации // Международный научный журнал «Вестник науки». – 2024. – Т. 1, № 7 (76). – С. 593–598.
5. Куприянова К.С. Разработка неравносторонних апертур цифрового фильтра лапласиан «усеченная пирамида» / К.С. Куприянова, К.А. Рылов, А.В. Каменский // Сб. избр. статей «Научной сессии ТУСУР»: матер. конф., Томск, 17–19 мая 2023 г.: в 3 ч. – Томск: В-Спектр, 2023. – Ч. 1. – С. 88–91.

**МЕТОДИКА ПРЕДОБРАБОТКИ И РАЗМЕТКИ ДАННЫХ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДАТАСЕТА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО
ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ РАСПОЗНАВАНИЯ
ХИРУРГИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ DA VINCI**

И.Д. Мусихин, аспирант каф. ТУ

*Научный руководитель В.В. Капустин, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, ilia.d.musikhin@tusur.ru*

Рассматривается проблема создания и разметки датасета для нейронной сети по архивированным 3D-видеоданным хирургических операций. Нейронная сеть предназначена для детекции и отслеживания перемещения хирургических инструментов робот-ассистирующей системы da Vinci.

Ключевые слова: датасет, CVAT, da Vinci, хирургические инструменты, нейронная сеть.

Объектом исследования являются 3D-видеоданные, формируемые робот-ассистирующими системами, а также внешние и внутренние процессы движений хирурга-оператора. Цель работы – создать методику предобработки и разметки данных для создания датасета с целью обучения нейронной сети. Нейросеть, предназначенная для обнаружения и отслеживания хирургических инструментов, позволит повысить эффективность подготовки и деятельность хирургов-операторов роботизированных хирургических комплексов, обеспечивающих преимущество в точности понимания ситуации на рабочем столе хирурга.

Для создания датасета Башкирским государственным медицинским университетом (БГМУ) [1] было предоставлено 100 видеофайлов, содержащих операции простатэктомии. Также вместе с видеофайлами предоставлены тайм-коды этапов операций. Следует отметить, что для каждой видеозаписи количество этапов может варьировать, максимальное количество этапов равно 17.

Видеофайлы были разделены на кадры согласно предоставленным тайм-кодам этапов с помощью кода, написанного на языке программирования Python. Экспериментальным путем выяснено, что для создания оптимального датасета с каждого этапа операции следует брать по 100 кадров.

После разделения видеозаписей на кадры производилась обрезка краев, так как кадры по краям содержат черные полосы. После обрезки краев кадры имеют разрешение 1280×1024 пикселей. Пример кадра до обрезки краев приведен на рис. 1.

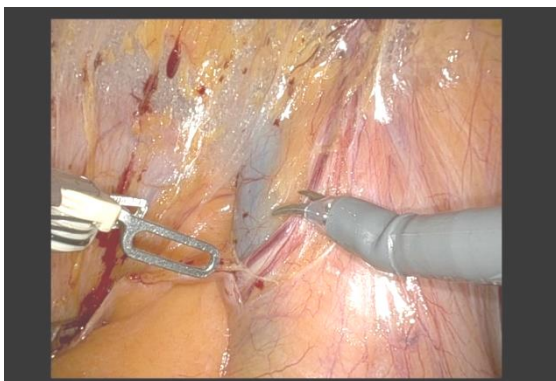


Рис. 1. Пример исходного кадра до обрезки краев

Для разметки хирургических инструментов использовалась программа Computer Vision Annotation Tool (CVAT) [2]. CVAT является свободно распространяемым инструментарием с открытым исходным кодом для аннотирования, разработанный компанией Intel. CVAT имеет множество типов аннотаций, прост в настройке и подходит для ручного аннотирования изображений. Для запуска CVAT использовался ПК с Windows 10, WSL и Docker. Для использования CVAT необходим только браузер. Интерфейс CVAT представлен на рис. 2.

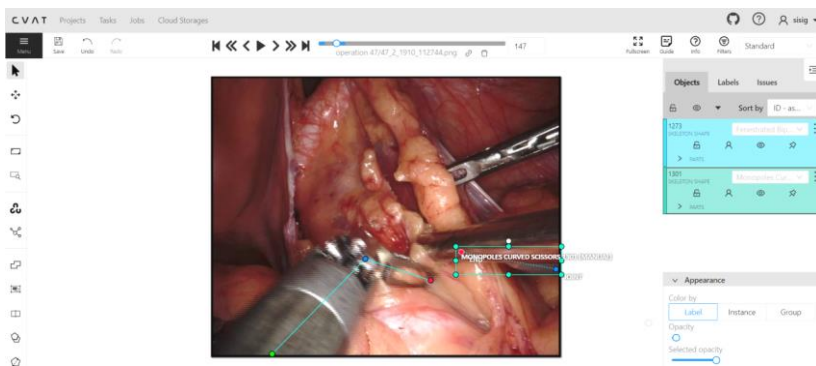


Рис. 2. Интерфейс CVAT

При помощи данного программного инструмента была произведена разметка четырех инструментов, используемых при проведении операций простатэктомии. Были размечены следующие инструменты: Fenestrated Bipolar Forceps (биполярные щипцы); ProGraps Forceps (щипцы ProGraps); Monopoles Curved Scissors (изогнутые ножницы); Large Needle Driver (иглодержатель).

После разметки инструментов данные загружаются в базу данных, которая предназначена для хранения эндоскопических операций и данных о разметке инструментов [3, 4].

Разработана методика предобработки и разметки данных для создания датасета. По этой методике полученные 100 видеозаписей операций разделены на 148 884 кадра, размечено 83 видеозаписи и 266 910 инструментов.

Исследование выполнено в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», стратегического проекта № 4 «Биомед», проекта № 64, от 21 марта 2024 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Официальный сайт Башкирского государственного медицинского университета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bashgmu.ru/>, свободный (дата обращения: 11.03.2025).

2. Официальный сайт CVAT [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cvat.ai/>, свободный (дата обращения: 11.03.2025).

3. Св-во о гос. регистрации базы данных № 2024620069 «ВЕО: 3D-видео-данные эндоскопических операций». Авторы: Н. Бородина, А.В. Каменский, В.Н. Павлов, А.Р. Билялов. Заявка № 2023624613. Дата поступления 06 декабря 2023 г. Зарегистрировано в реестре баз данных 09.01.2024.

4. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024664405 «ВЕОmigration: 3D-видео-данные эндоскопических операций». Авторы: Н. Бородина, А.А. Филимонцева, А.В. Каменский. Заявка № 2024663255. Дата поступления 11 июня 2024 г. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 20.06.2024 г.

УДК 004.932.4

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИЙ АВТОМАТИЧЕСКОГО УЛУЧШЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛА ПРИЛОЖЕНИЯ ФОТОРЕДАКТОРА

К.Д. Нигматуллин, студент каф. ТУ

*Научный руководитель А.В. Каменский, доцент каф. ТУ, к.т.н.
Проект ГПО ТУ-2002. Исследование и разработка методов анализа
и обработки фото- и видеоданных в телевизионных
измерительных системах*

г. Томск, ТУСУР, nigmatullin.k@internet.ru

Представлены результаты разработки функций цветокоррекции, удаления шумов, автоматического контрастирования. Выполнен обзор функций современных фоторедакторов. Проведено модульное и интеграционное тестирование.

Ключевые слова: цветокоррекция, шумоподавление, приложение, разработка, обработка, изображение.

Наиболее популярные современные фоторедакторы имеют внушительное функциональное наполнение, которое может быть полезным как для профессионального пользователя, так и обычного пользователя, большинство из них имеют одинаковый или схожий друг с другом функционал. Были выбраны одни из самых востребованных функций обработки изображений, а именно: цветокоррекция, подавление шумов, автоконтраст [1].

На основе проведенного сравнения функциональных возможностей фоторедакторов можно сделать вывод, что Adobe Photoshop и Affinity Photo являются лидерами в области цветокоррекции, удаления шумов и автоматической настройки контраста. Photoshop, благодаря интеграции технологии Adobe Sensei, предлагает наиболее продвинутые инструменты для автоматической цветокоррекции и подавления шумов, что делает его оптимальным выбором для профессионалов, требующих высокой точности и качества обработки изображений.

Для пользователей, которым важны простота и доступность, Photopea и Corel PaintShop Pro предлагают схожий с Photoshop функционал. GIMP и Krita, будучи бесплатными решениями, предоставляют базовые инструменты для ручной коррекции, но уступают в автоматизации процессов [2]. Сравнение данных функций в различных редакторах представлено в таблице.

На основе проведенного сравнения функциональных возможностей фоторедакторов можно сделать вывод, что Adobe Photoshop и Affinity Photo являются лидерами в области цветокоррекции, подавления шумов и автоматической настройки контраста.

Реализация этих функций выполнена на языке программирования C++ с использованием среды разработки Qt.

Цветокоррекция – это процесс изменения яркости, контрастности и цветовых каналов (красного, зеленого и синего) изображения. Для реализации цветокоррекции были использованы следующие элементы:

Слайдеры. Пользователь может регулировать яркость, контрастность и интенсивность цветовых каналов с помощью слайдеров.

Алгоритм коррекции:

а) яркость – добавляется постоянное значение к каждому каналу (R, G, B);

б) контрастность – увеличивается или уменьшается разница между светлыми и темными участками изображения;

в) цветовые каналы – интенсивность каждого канала (R, G, B) регулируется независимо.

Шумы на изображении – это случайные искажения, которые ухудшают его качество.

Сравнение функций фоторедакторов

Фоторедактор	Ручная цветокоррекция	Удаление шумов	Автоматический контраст
Adobe Photoshop	Расширенные настройки, включая HSL/HSV-коррекцию	Использует AI Noise Reduction для эффективного подавления шумов	Включает функцию «Auto Contrast»
GIMP	Инструменты «Кривые», «Уровни» и «Цветовой баланс»	Поддерживает подавление шумов через плагины, такие как G'MIC	Поддерживает автоматическое регулирование контраста
Krita	Инструменты «Кривые» и «Уровни»	Включает базовые инструменты для подавления шумов	Не поддерживает автоматическое регулирование контраста
Affinity Photo	Профессиональные инструменты, включая кривые и HSL-коррекцию	Поддерживает функцию подавления шумов	Включает функцию автоматического контраста
Paint.NET	Базовые инструменты, такие как «Кривые» и «Уровни»	Частично поддерживает подавление шумов через плагины	Частично поддерживает автоматическое регулирование контраста
Photopea	Полностью повторяет функционал Photoshop	Поддерживает подавление шумов аналогично Photoshop	Поддерживает автоматическое регулирование контраста

Целью реализации данной функции было подавление шумов с использованием медианного фильтра, который эффективно устраняет мелкие дефекты, сохраняя при этом края объектов. Медианный фильтр работает следующим образом:

- для каждого пикселя рассматривается его окрестность (ядро 3×3);
- значения всех пикселей в окрестности сортируются;
- текущий пиксель заменяется на медианное значение из отсортированного списка.

Автоматическое регулирование контраста – это процесс улучшения визуального качества изображения за счёт растяжения гистограммы яркости. Целью реализации данной функции было автоматическое улучшение контраста без необходимости ручной настройки. Алгоритм работает следующим образом:

- находится минимальное и максимальное значения яркости на изображении;
- значения яркости каждого пикселя масштабируются так, чтобы минимальное значение стало 0, а максимальное – 255.

Для тестирования функций были выбраны две методики:

1. Модульное тестирование.
2. Интеграционное тестирование.

Целью модульного тестирования является проверка каждой функции по отдельности с подготовленными изображениями с заранее известными параметрами:

- изображение с высокой яркостью, где большинство пикселей имеют значения яркости, близкие к 255 (максимальная яркость). Цель – проверить, как функция корректирует яркость, особенно в случаях, когда их значения близки к предельным;

- изображение с низким контрастом: изображение, где разница между минимальной и максимальной яркостью небольшая (например, диапазон яркости от 100 до 150). Цель – проверить, как функция корректирует контрастность в случае с узким диапазоном яркости;

- изображение с добавленным случайным шумом (начальный уровень шума 41,56 дБ). Цель – проверить, насколько эффективно функция подавляет шум, сохраняя при этом детали изображения.

Полученное изображение имеет уровень шума – 29,98 дБ.

По результатам прохождения модульного тестирования все функции достоверно обработали изображения.

Задачей интеграционного тестирования является проверка взаимодействия и работоспособности функций между собой. Заранее подготовленным изображением являлась фотография с уровнем шума (55,23 дБ). После обработки было получено изображение с измененным контрастом, цветокоррекцией, а также с меньшим уровнем шума (40,67 дБ). Это значит, что функции прошли 2 методики тестирования и являются полностью пригодными для внедрения в приложение фоторедактора.

В результате данной работы были выполнены обзор популярных редакторов и сравнение их по востребованным функциям. На этапе разработки и тестирования функции коррекции изображений для фоторедактора были успешно реализованы и протестированы.

Таким образом, проведенная работа позволила создать рабочий прототип фоторедактора с ключевыми функциями коррекции и возможностью дальнейшего расширения функционала.

ЛИТЕРАТУРА

1. ТОП-9 фоторедакторов для компьютера [Электронный ресурс]: рейтинг программ для редактирования изображений. – URL: <https://vc.ru/rejting/1594227-programmy-dlya-obrabotki-foto-na-kompyutere-top-9-fotoredaktorov> (дата обращения: 14.02.2025).

2. 20 лучших программ для редактирования фотографий на ПК [Электронный ресурс]: обзор программ для работы с изображениями. – URL: <https://vseprosto.com/top-20-photo-editing-software-for-pc/> (дата обращения: 15.02.2025).

ПРИМЕНЕНИЕ NeRF ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ

А.В. Новоренских, магистрант каф. АСУ

Научный руководитель М.Ю. Катаев, проф. каф. АСУ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, nandrey2015@gmail.com

NeRF (Neural Radiance Fields) – метод создания объемных 3D-моделей на основе нейросетей, который аппроксимирует сцену как непрерывное поле радиации. В работе анализируются трехмерное представление NeRF через параметры плотности и цвета, а также методы экспорта результатов в традиционные форматы. Рассматриваются ключевые проблемы: вычислительная сложность, зависимость от качества исходных данных, ограничения в воспроизведении динамических сцен и сложных материалов. Обсуждаются современные решения, включая ускорение обучения (Instant NeRF), адаптивные алгоритмы экспорта и интеграцию с физическими моделями.

Ключевые слова: NeRF, Marching Cubes, 3D-моделирование, объемное представление, нейросети, динамические сцены, вычислительная сложность, текстуры, прозрачность, рендеринг, воксельная сетка, дифференцируемый рендеринг, плоскость изуровня, гибридные методы.

Впервые представленный в 2019 г. [1] NeRF позволяет восстанавливать детализированные сцены из множества 2D-изображений с разных ракурсов, не требуя явного 3D-моделирования. Однако несмотря на его потенциал, применение NeRF для создания традиционных 3D-моделей сопряжено с рядом сложностей, связанных с вычислительной интенсивностью, ограничениями в экспорте и зависимостью от качества данных.

Трехмерное представление в NeRF. NeRF представляет сцену как поле радиации [1], где каждая точка (x, y, z) и направление взгляда (d) связаны с цветом (r, g, b) и плотностью (σ) . Цвет отражает световой спектр, плотность – материальные свойства (например, воздух и твердые объекты). Модель использует два многослойных перцептрона (MLP): один оценивает плотность по координатам, другой – цвет по направлению. Позиционное кодирование улучшает их обобщение. Для рендеринга применяется лучевая трассировка: луч разбивается на точки, вычисляются σ и c , после чего используется формула объемного рендеринга для воспроизведения освещения и текстур.

Преобразование NeRF в меш требует дискретизации поля. Основной метод – Marching Cubes [2], строящий сетку по воксельной

плотности с заданным порогом. Для повышения точности применяют дифференциальные методы (например, обучение SDF [3]) или гибриды типа NSVF [4], сочетающие NeRF с вокселями для ускорения.

Проблемы использования NeRF.

1. Обучение занимает часы на GPU, экспорт высокого разрешения (512^3 вокселей) требует много памяти.
2. Необходимы многочисленные калиброванные снимки. Недостаток данных или динамические объекты вызывают артефакты.
3. Низкое разрешение Marching Cubes приводит к «лесенке», а зависимость цвета от направления усложняет текстурирование.
4. NeRF – «черный ящик», редактирование геометрии требует переобучения.

Прозрачные/отражающие поверхности и мелкие детали воспроизводятся некорректно из-за игнорирования физики света.

Для демонстрации недостатков использования классической архитектуры NeRF использована скульптура «Древо знаний». Для проведения тестирования с нескольких ракурсов был снят объект интереса. После обучения нейронной сети был получен рендер объекта (рис. 1).



Рис. 1. Скульптура в представлении NeRF

На основе полученного рендера методом Marching Cubes была создана и экспортирована трехмерная модель (рис. 2, а). Результирующая модель содержит визуальные артефакты, вызванные низким качеством исходных кадров. Модель также содержит внутри себя вершины и плоскости (см. рис. 2, б), что является следствием трехмерного представления NeRF в виде облака точек. Это негативно ска-

зывается на размере файла модели и дальнейшей работе с ней. В данном случае модель содержит 357 818 точек и 1 049 513 граней, а размер файла составляет 55,4 МБ.



а *б*
Рис. 2. Экспортированная модель

Перспективы и решения. NeRF изменил подход к 3D-моделированию, но его применение остается сложным из-за вычислительной интенсивности, зависимости от данных и ограничений в экспорте. Ключевые проблемы связаны с артефактами Marching Cubes, низкой производительностью и «черным ящиком».

Современные исследования предлагают решения для улучшения NeRF. Instant NeRF [5] и Plenoxels [6] ускоряют обучение за счет гибридных архитектур. Адаптивные алгоритмы Marching Cubes и дифференциальные методы улучшают качество геометрии.

В целом с развитием алгоритмов и аппаратных средств NeRF становится перспективным для задач, где важны детализация и реалистичное освещение. В будущем он может стать стандартом для создания 3D-моделей без ручного труда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neural volumes: Learning dynamic renderable volumes from images / S. Lombardi, T. Simon, J. Saragih, G. Schwartz, A. Lehrmann, Y. Sheikh // ACM Transactions on Graphics – 2019. – Vol. 38, No. 4. – P. 65:1–65:14.
2. Yiyi Liao. Deep Marching Cubes: Learning Explicit Surface Representations / Yiyi Liao, Simon Donn'e, Andreas Geiger // In Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2018. – Vol. 2, No. 4. – P. 20.
3. 3PSDF: Three-Pole Signed Distance Function for Learning Surfaces with Arbitrary Topologies / W. Chen, C. Lin, W. Li, B. Yang [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2205.15572>, свободный (дата обращения: 01.02.2025).

4. Neural Sparse Voxel Fields / L. Liu, J. Gu, K.Z. Lin, T. Chua, C. Theobalt [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2205.15572>, свободный (дата обращения: 13.02.2025).

5. Stephens J. Getting Started with NVIDIA Instant NeRFs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.nvidia.com/blog/getting-started-with-nvidia-instant-nerfs/>, свободный (дата обращения: 15.02.2025).

6. Plenoxels: Radiance Fields without Neural Networks / A. Yu, S. Fridovich-Keil, M. Tancik, Q. Chen, B. Recht, A. Kanazawa [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2112.05131>, свободный (дата обращения: 15.02.2025).

УДК 004.932.2

МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННОЙ ВИДИМОСТИ

А.В. Шалеев, инж. ЛРЭВ; А.И. Елизаров, с.н.с. ЛРЭВ, к.т.н.

г. Томск, ИОА СО РАН, sav@iao.ru

Обнаружение объектов в условиях ограниченной видимости является ключевой задачей для систем мониторинга пространства. Методы компьютерного зрения, используемые в таких системах, могут испытывать трудности при работе в сложных погодных условиях, таких как туман или дымка. Выполнены обзор и сравнительный анализ методов улучшения качества изображений, направленных на снижение влияния негативных факторов атмосферных условий. Результаты исследования позволяют сделать выводы о применимости различных методов для повышения точности и надежности обнаружения объектов в сложных условиях наблюдения.

Ключевые слова: туман, дымка, обработка изображений.

В современном мире задача обнаружения объектов становится все более востребованной в различных областях, таких как гражданские, коммерческие и военные применения. Расширение сфер применения данной задачи приводит к необходимости создания эффективных систем анализа окружающей среды. Одним из ключевых подходов для решения этой задачи является использование компьютерного зрения, которое позволяет обрабатывать изображения или видеопотоки, полученные с камер наблюдения. Однако в условиях тумана и дымки качество изображений существенно ухудшается, что создает сложности для точной идентификации объектов. Основные проблемы связаны с потерей контраста, снижением детализации и появлением артефактов. Для преодоления этих ограничений применяются методы улучшения качества изображений, направленные на повышение четкости и информативности визуальных данных. Целью работы является

ся анализ и сравнение методов улучшения качества изображений, полученных в условиях тумана или дымки.

Традиционные методы обработки изображений, такие как эквализация гистограммы, не всегда способны справиться с локальными изменениями яркости и контраста, вызванными туманом. Поэтому требуется применение более сложных и адаптивных подходов, таких как CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) [1], темный канал (Dark Channel Prior) [2] и Retinex [3]. Для оценки эффективности рассматриваемых в работе методов используется метрика BRISQUE (Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator), которая позволяет количественно оценить качество изображений без необходимости сравнения с эталоном.

В условиях тумана или дымки качество изображений ухудшается из-за рассеяния света на микроскопических частицах, находящихся в атмосфере. Физическая модель формирования изображения при этом описывается с учетом рассеивания и поглощения света. Соответственно, методы удаления тумана направлены на восстановление исходного качества изображения путем оценки и компенсации потерь информации, вызванных рассеянием и поглощением.

Метод темного канала основан на предположении, что в большинстве естественных сцен существует хотя бы один из цветовых каналов, имеющих низкую интенсивность. Этот метод позволяет оценить вклад рассеяния за счет применения атмосферной модели Кошмидера и восстановить исходную яркость объекта. Но за счет допущений, которые используются для реализации метода, возможно появление артефактов на ярких объектах. CLAHE – это метод адаптивного выравнивания гистограммы с ограничением контраста. Группа Retinex алгоритмов может быть использована для удаления тумана, разделяя освещенность и отражательную способность поверхности.

Следует отметить, что некоторые современные подходы к удалению тумана часто используют нейросетевые модели [4]. Однако эти методы имеют свои ограничения. Создание качественной обучающей выборки для обучения таких моделей затруднено из-за необходимости получения парных изображений (искаженных и не искаженных туманом). Использование синтезированных изображений для обучения нейросетей также не является оптимальным решением, так как модели обучаются на искусственных артефактах, которые не соответствуют реальным условиям.

Для оценки улучшения качества изображений был проведен ряд тестов на изображениях с различной степенью затуманенности. Каждое изображение обрабатывалось методами CLAHE, темного канала и

Retinex с последующей оценкой качества с использованием критерия BRISQUE. Параметры каждого метода настраивались для достижения оптимального результата по выбранному критерию. Анализировались как визуальные изменения в изображениях, так и количественные показатели.

В результате проведенного анализа было установлено, что метод CLAHE демонстрирует способность к улучшению локального контраста, что делает его полезным для выделения деталей на изображении. Темный канал подтверждает свою эффективность в задачах удаления тумана, хотя и может формировать артефакты на ярких участках изображения. Что касается метода Retinex, то, несмотря на его потенциальную способность сохранять естественную цветопередачу при правильной настройке параметров, он проявляет значительные ограничения в автоматизированных системах обработки изображений. В частности, необходимость ручной настройки параметров и высокая чувствительность к их выбору могут привести к существенным искажениям цветовой информации, делая его использование в автоматических системах малоприменимым.

Применение нейросетевых подходов для решения данной задачи также оказывается нецелесообразным по ряду причин. Нейросети требуют большого объема качественных данных для обучения, что в случае с реальными изображениями, искаженными туманом, представляет собой серьезную проблему, поскольку создание соответствующей обучающей выборки крайне затруднительно. Даже при наличии такой выборки нейросети могут вносить собственные артефакты или изменять детали изображения на основе своей обучающей базы, что недопустимо для критически важных систем мониторинга и безопасности. Таким образом, использование нейросетей в данном контексте оказывается менее предпочтительным решением по сравнению с традиционными методами обработки изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Soni B., Mathur P. An improved image dehazing technique using CLAHE and guided filter // 2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). – New York City: IEEE, 2020. – P. 902–907.
2. He K. Single image haze removal using dark channel prior / K. He, J. Sun, X. Tang // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2010. – Vol. 33, No. 12. – P. 2341–2353.
3. Wen H. A survey of image dehazing algorithm based on retinex theory / H. Wen, F. Dai, D. Wang // 2020 5th International Conference on Intelligent Informatics and Biomedical Sciences (ICIIBMS). – New York City: IEEE, 2020. – P. 38–41.
4. Dehazenet: An end-to-end system for single image haze removal / B. Cai, X. Xu, K. Jia, C. Qing, D. Tao // IEEE transactions on image processing. – 2016. – Vol. 25, No. 11. – P. 5187–5198.

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗРАБОТКИ ПРИЛОЖЕНИЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

К.А. Шерифов, студент каф. ТУ

Научный руководитель А.В. Каменский, доцент каф. ТУ, к.т.н.

*Проект ГПО ТУ-2002. Исследование и разработка методов
анализа и обработки фото- и видеоданных
в телевизионных измерительных системах
г. Томск, ТУСУР, kirya.sherifov@mail.ru*

Представлен анализ современных технологий, используемых для разработки приложений визуализации изображений. Основное внимание уделено интеграции фреймворка Qt с библиотекой OpenGL и применению шейдеров GLSL. Рассмотрены преимущества выбора этих инструментов, их роль в обработке графики, а также возможности создания кроссплатформенных решений. Приведено сравнение Qt с альтернативными платформами, обоснована эффективность связки Qt – OpenGL для задач рендеринга.

Ключевые слова: Qt, OpenGL, GLSL, визуализация, обработка изображений, кроссплатформенность, шейдеры.

Современные приложения для работы с изображениями требуют высокой производительности, гибкости интерфейса и поддержки сложных графических операций. Особую роль в таких задачах играют технологии, обеспечивающие рендеринг, коррекцию цвета и применение эффектов. Лучшее решение для этой задачи – использовать связку Qt и OpenGL как основу для создания инструментов визуализации, а также ключевую роль играют шейдеры GLSL в обработке графики.

Qt – кроссплатформенный фреймворк, предоставляющий инструменты для разработки приложений с графическим интерфейсом. Его ключевые преимущества [1]:

- классы `QOpenGLWidget` и `QOpenGLFunctions` упрощают встраивание OpenGL-контекста в Qt-приложения, обеспечивая прямой доступ к функциям рендеринга;

- поддержка мультимедийных изображений: Qt поддерживает загрузку и отображение форматов PNG, JPG, BMP и др. через классы `QImage` и `QPixmap`;

- гибкость интерфейса: возможность комбинировать стандартные элементы управления (кнопки, слайдеры) с OpenGL-виджетами для создания интуитивных инструментов.

Сравнение Qt с альтернативными платформами представлено в таблице.

Сравнение Qt с альтернативными платформами

Платформа	Кросс-платформенность	Интеграция с OpenGL	Производительность
Qt	Да	Полная	Высокая
JavaFX	Да	Частичная	Средняя
Electron	Да	Через WebGL	Низкая
WPF	Нет	Нет	Высокая (только на Windows)

Qt демонстрирует наилучший баланс между производительностью и доступностью, что критично для приложений, работающих с большими изображениями.

OpenGL – стандарт для аппаратно-ускоренного рендеринга 2D/3D-графики. Его использование в связке с Qt обеспечивает высокую производительность: рендеринг выполняется напрямую через GPU, что критично для обработки изображений в реальном времени [2].

В базовом смысле шейдеры – это не что иное, как программы, преобразующие входные данные в выходные.

Вершинные и фрагментные шейдеры GLSL позволяют реализовать сложные эффекты [3]:

- коррекция цвета – изменение яркости, контраста, баланса RGB через математические операции над пикселями;
- фильтрация – применение размытия, резкости или медианного фильтра для устранения шумов;
- наложение текстур – использование текстурных карт для имитации материалов или добавления эффектов;
- шейдерные программы компилируются на этапе выполнения, что обеспечивает гибкость в настройке эффектов.

Интеграция Qt с OpenGL позволяет загружать изображения в формате QImage и преобразовывать их в OpenGL-текстуры, динамически обновлять параметры шейдеров (например, яркость или контраст) через uniform-переменные, обеспечивать плавный интерфейс даже при работе с изображениями высокого разрешения.

Коммерческие продукты (Adobe Photoshop, GIMP) используют собственные движки рендеринга, что ограничивает их кастомизацию. Open-source альтернативы (Krita, Inkscape) часто не поддерживают аппаратное ускорение в полной мере. Разработка на Qt и OpenGL позволяет создавать приложения с открытым кодом, где можно:

- адаптировать интерфейс под нужды пользователя (например, добавить панель для коррекции гистограммы);

- обеспечить кроссплатформенность без потери производительности;
- связка Qt и OpenGL предоставляет разработчикам мощный инструментарий для создания интерактивных приложений визуализации изображений;
- гибкость: возможность комбинировать Qt-виджеты с OpenGL-рендерингом;
- производительность: использование GPU через шейдеры GLSL для сложных операций;
- кроссплатформенность: поддержка Windows, Linux, macOS и мобильных ОС.

Перспективным направлением является интеграция нейросетевых моделей для автоматической коррекции изображений и расширение поддержки VR-интерфейсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Официальная документация Qt [Электронный ресурс]. – URL: <https://doc.qt.io/> (дата обращения: 14.02.2025).
2. OpenGL Programming Guide [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.khronos.org/opengl/> (дата обращения: 17.02.2025).
3. GLSL Shaders for Image Processing [Электронный ресурс]. – URL: <https://learnopengl.com/Advanced-OpenGL/Advanced-GLSL> (дата обращения: 18.02.2025).

УДК 004.932.2

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОБЪЕДИНЕНИЯ СОСЕДНИХ ПИКСЕЛЕЙ И АЛГОРИТМА НА БАЗЕ SRGAN

А.Н. Шлыкович, аспирант каф. ТУ

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

Рассматривается процесс повышения отношения сигнал/шум (ОСШ) изображений с применением метода объединения соседних пикселей в сочетании с алгоритмом на основе SRGAN. Для оценки эффективности повышения качества изображений используется критерий отношения сигнал/шум, который позволяет определить, насколько успешно удалось улучшить визуальные характеристики.

Ключевые слова: интерполяция, изображение, объединение соседних пикселей, ОСШ, нейронная сеть, SRGAN.

В рамках данной работы был выбран язык программирования Python, который стал основой для реализации проекта. Для достиже-

ния поставленных задач были задействованы библиотеки, такие как OpenCV [1] и NumPy [2]. Разработка проводилась в удобной среде PyCharm, что значительно упростило процесс программирования. Библиотека OpenCV предоставляет все необходимые алгоритмы для обработки изображений, а NumPy обеспечивает эффективное управление массивами данных, что является ключевым для работы с изображениями. Для реализации нейронной модели использовалась SRGAN, результаты обучения которой представлены в [3].

Для оценки качества полученных изображений как с шумами, так и после их обработки с использованием алгоритма на базе SRGAN применялся метод SNR (отношение сигнал/шум) ОСШ. Оценки ОСШ производятся по однородной области изображения. Эта методика широко используется в области визуализации и служит для оценки характеристик качества изображений, позволяя количественно оценить, насколько успешно удалось улучшить их визуальные характеристики [4].

В качестве исходного изображения для исследования было выбрано черно-белое изображение размером 1280×720 пикселей в формате BMP. Для сравнения зашумленных изображений с результатами, полученными с помощью нейронной модели SRGAN, применялся метод биннинга пикселей. Эта технология объединяет соседние пиксели, преобразуя четыре небольших субпикселя в один крупный «суперпиксель», что приводит к пропорциональному уменьшению разрешения в четыре раза и к повышению ОСШ изображения в 2 раза (для белого гауссовского шума) [5]. На рис. 1 представлено исходное изображение.

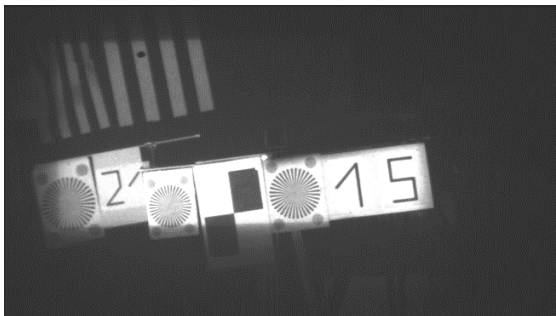


Рис. 1. Исходное изображение

На рис. 2 представлены фрагменты эталонного изображения, а также изображения, подвергнутые различным видам зашумления, включая гауссов шум, шум Пуассона, шум «соль и перец», а также

спекл-шум. Кроме того, здесь можно увидеть результаты обработки, полученные с помощью нейронной сети SRGAN.

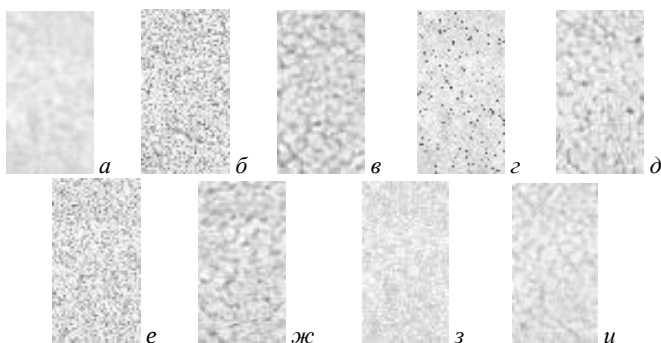


Рис. 2. Полученные изображения: *а* – эталон; *б* – шум Гаусса; *в* – SRGAN; *г* – шум Пуассона; *д* – SRGAN; *е* – шум «соль и перец»; *ж* – SRGAN; *з* – спекл-шум; *и* – SRGAN

Полученные результаты среднего значения ОСШ для 1 канала представлены в таблице.

Полученные результаты оценки ОСШ в дБ (до – зашумленное изображение, после – изображение, полученное нейронной модели SRGAN)

Шум Гаусса		Шум Пуассона		Соль и перец		Спекл-шум	
До	После	До	После	До	После	До	После
18,83	23,09	20,04	23,58	19,97	23,44	26,27	27,28

При применении нейронной модели SRGAN и объединении соседних пикселей по данным, представленным в таблице, наблюдается, что наибольшее улучшение в уровне ОСШ достигается при обработке шума «соль и перец». В то же время наименее эффективной оказывается обработка спекл-шума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суков А.В. Компьютерное зрение. Библиотека OpenCV и ее применение в прикладных задачах робототехники. – ДНР, Донецк, ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», 2016 (дата обращения: 1.03.2025).
2. Хабр, 2021 // Библиотека NumPy Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/352678/>, свободный (дата обращения: 2.03.2025).
3. Шлыкович А.Н. Сравнение классических методов интерполяции изображения с моделью искусственной нейронной сети SRGAN / А.Н. Шлыкович, С.А. Забуга // Электронные средства и системы управления. Раздел: Видео-

информационные технологии: матер. докл. XVIII Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2022. – Ч. 2. – С. 148–150.

4. Серкин Ф.Б. Сравнительный анализ алгоритмов оценки отношения сигнал-шум на основе квадратурных компонент принимаемого сигнала / Ф.Б. Серкин, Н.А.Важенин, В.В. Вейцель // Труды МАИ. – 2015. – № 83. – С. 19.

5. Pixel binning, 2024 // What is pixel binning? Smartphone sensor technology explained [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://amateurphotographer.com/technique/what-is-pixel-binning-smartphone-sensor-technology-explained/>, (дата обращения: 10.03.2025).

УДК 004.932.4

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ ХИРУРГИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ

В.С. Гринько, С.Ж. Шойнжурова, студенты

*Научный руководитель И.Д. Мусихин, ассистент каф. ТУ
Проект ГПО ТУ-2501. Разработка нейросетевых алгоритмов
для систем технического зрения с использованием цифровых
двойников объектов интереса*

г. Томск, ТУСУР, sesegmashoinjurova2006@gmail.com

Рассмотрены процесс подготовки датасета и обучение нейронной сети YOLOv8x-rose-r6. Описаны этапы формирования обучающей выборки, использования методов аугментации и обучения модели. Представлен анализ полученных результатов и определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: датасет, нейронная сеть, эндоскопические операции, компьютерное зрение, медицинские изображения.

Современные методы компьютерного зрения находят широкое применение в медицинской сфере, особенно в задачах анализа изображений [1]. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания надежных алгоритмов автоматического анализа изображений, что позволяет ускорить диагностические процессы и минимизировать вероятность человеческих ошибок. Автоматизация детекции и классификации медицинских инструментов позволяет снизить нагрузку на врачей и повысить точность диагностических процедур. В данной работе рассматривается процесс подготовки обучающего датасета и тренировки нейронной сети для распознавания хирургических инструментов в эндоскопических изображениях.

Исходный набор данных формировался из видеозаписей эндоскопических операций. Разметка изображений осуществлялась в Computer Vision Annotation Tool (CVAT) [2]. Для каждого объекта

выставлялись ограничивающая рамка и набор ключевых точек (начало, середина и конец инструмента). Разметка выполнялась вручную, что позволило минимизировать ошибки и обеспечить высокое качество данных. В качестве объектов интереса выступали медицинские инструменты: ProGraps Forceps (щипцы ProGraps), Large Needle Driver (иглодержатель), Monopolar Curved Scissors (изогнутые ножницы) и Fenestrated Bipolar Forceps (биполярные щипцы) (рис. 1). Общий объем датасета составил 7 444 изображения, содержащих около 16 088 аннотированных объектов (таблица).

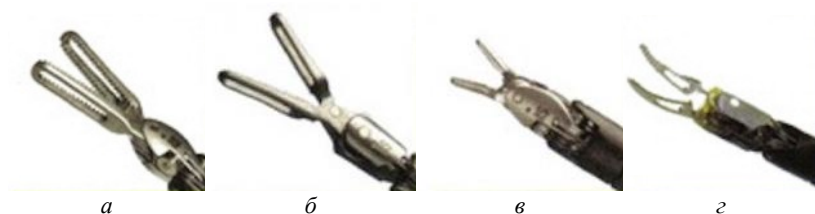


Рис. 1. Медицинские инструменты: *а* – ProGraps Forceps; *б* – Large Needle Driver; *в* – Fenestrated Bipolar Forceps; *г* – Monopoles Curved Scissors

Статистика размеченных инструментов

	Fenestrated Bipolar Forceps	ProGraps Forceps	Monopoles Curved Scissors	Large needle driver	Кол-во кадров	Всего инструментов
Кол-во	6 348	2 780	5 332	1 628	7 444	16 088
Кол-во, %	39,45	17,27	33,14	10,11	–	100

В качестве нейронной сети для этой задачи была выбрана модель нейросети YOLOv8x-pose-p6 [3], адаптированной для детекции объектов и их ключевых точек. You Only Look Once (YOLO) – эта модель выполняет детекцию объектов в реальном времени, разбивая изображение на сетку и предсказывая границы объектов и классы в каждой ячейке. Выбранная модель отличается высокой скоростью и эффективностью в сравнении с другими версиями YOLOv8 [4]. Обучение нейросети на протяжении 100 эпох, полученных в конечном итоге датасетом, заняло около 23 ч. Точность модели оценивалась по метрикам, представленным на рис. 2.

Полученные результаты показывают, что модель демонстрирует достаточную точность при классификации объектов. Проверка обученной нейронной сети показала, что текущего набора подготовленных данных недостаточно для достижения максимальной точности и стабильности ввиду явного количественного превосходства некото-

рых инструментов в сравнении с другими (по количеству превосходят остальные типы инструментов).

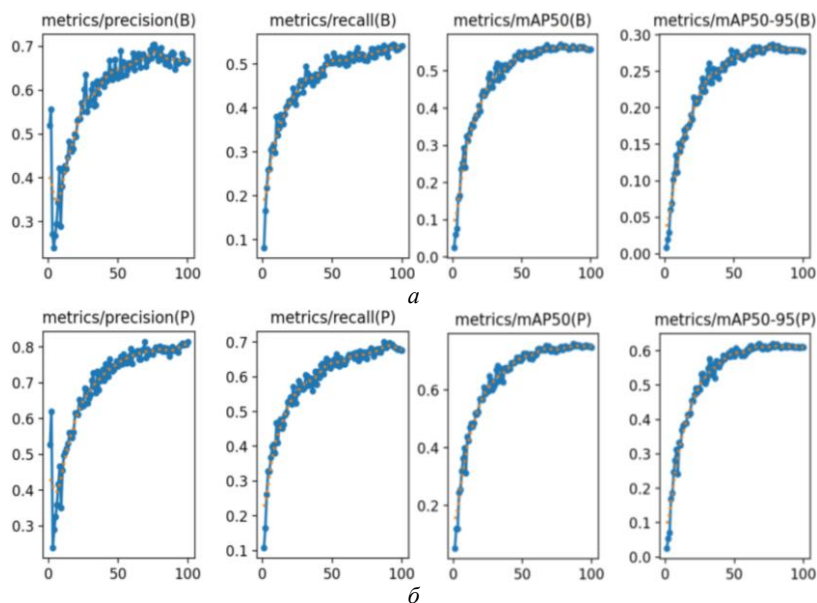


Рис. 3. Метрики нейронной сети для точности выставления:
 a – ограничивающей рамки; b – ключевых точек

В дальнейшем планируется расширение датасета за счёт увеличения количества изображений и обеспечения равномерного распределения данных для каждого класса объектов интереса. Также будет произведена более тонкая настройка параметров модели для улучшения её производительности и точности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукашик Д.В. Анализ современных методов сегментации изображений // Экономика и качество систем связи. – 2022. – Т. 26, № 2. – С. 57–65.
2. Annotation tools in gastrointestinal polyp annotation / O. Selnes, T. Bjorsum-Meyer, A. Histace, G. Baatrup, A. Koulaouzidis // Diagnostics. – 2022. – Vol. 12, No. 10. – P. 2324.
3. Gu K. A study of human pose estimation in low-light environments using YOLOv8 model / K. Gu, B. Su // Applied and Computational Engineering. – 2024. – Vol. 32. – P. 136–142.
4. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024667182 «МИТ: Трекер медицинских инструментов». Авторы: С.Е. Бояркин, А.В. Каменский. Заявка № 2024665950. Дата поступления 11 июля 2024 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 июля 2024.

**ЭМУЛИРОВАННЫЕ КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ:
НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

С.Ю. Тырышкин, доцент каф. ИВТиИБ, к.т.н.

г. Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, service.vip-spe@yandex.ru

Рассматривается применение улучшенного квантово-вдохновленного алгоритма оптимизации волчьей стаи (Improved Quantum Inspired Grey Wolf Optimization, IQWGWо) для настройки параметров поддержки векторной машины (SVM) с целью повышения точности диагностики рака молочной железы. Предложенный метод был протестирован на наборе данных, включающем клинические случаи пациентов с раком молочной железы. Результаты показали значительное улучшение показателей точности, чувствительности и специфичности по сравнению с традиционными методами классификации. Проведенный анализ подтверждает перспективность использования эмулированных квантовых вычислений в задачах обработки видеоизображений в областях медицинской диагностики и распознавания элементов в массивах видеоданных.

Ключевые слова: эмулированные квантовые вычисления, диагностика, квантовая защита видеoinформации, LZW, Quantum SVM, квантовые вычисления.

Современные видеoinформационные системы играют ключевую роль во многих сферах жизни – от видеонаблюдения до автоматизированной аналитики больших объемов видеоданных. Одним из перспективных направлений развития этих технологий являются квантовые вычисления, способные значительно ускорить обработку сложных задач и улучшить качество решений [1]. Однако полноценное использование квантовых компьютеров остается ограниченным из-за высокой стоимости оборудования и сложности реализации. Сравнительный анализ классических и квантовых алгоритмов показывает перспективность развития последних [2]. Альтернативный подход – эмуляция квантовых алгоритмов на классических компьютерах – позволяет тестировать идеи и прототипы перед внедрением на реальных квантовых устройствах. В работе рассматриваются несколько примеров разработок, использующих эмулированные квантовые вычисления в области видеoinформационных технологий.

Основные принципы эмулированных квантовых вычислений. Эмулированные квантовые вычисления (EQC) имитируют работу квантового компьютера на классическом оборудовании. Это достигается путем моделирования квантовых состояний и операций с ис-

пользованием обычных процессоров и памяти. Несмотря на то, что такие симуляции требуют значительных вычислительных ресурсов, они позволяют исследователям и разработчикам экспериментировать с квантовыми алгоритмами без необходимости иметь доступ к дорогостоящим квантовым устройствам.

Примеры приложений в видеоинформационных технологиях

1. *Квантовая обработка изображений.* Традиционные методы обработки видеоизображений требуют решения ряда критических вопросов, таких как повышение точности и эффективности алгоритмов при работе с большими объемами данных. Эмулированные квантовые вычисления предлагают новый подход к решению этих проблем. Например, алгоритм Grover's Search может использоваться для поиска объектов на изображениях с меньшей сложностью, чем классические методы. В одном из исследований [3] была продемонстрирована эффективность квантового поиска в задачах сканирующей маммографии.

2. *Квантовое сжатие видео.* Сжатие видео является критически важной задачей в современных мультимедийных системах. Классические алгоритмы, такие как H.264 и HEVC, уже достигли высоких уровней эффективности, однако эмулированные квантовые вычисления открывают новые возможности. В частности, квантовый алгоритм LZW (Lempel-Ziv-Welch), адаптированный для работы на квантовом компьютере, показывает потенциал для значительного уменьшения размера видеофайлов без потери качества [4].

3. *Квантовые алгоритмы машинного обучения.* Машинное обучение играет важную роль в анализе видеоданных, включая распознавание образов, сегментацию и трекинг объектов. Квантовые алгоритмы, такие как квантовый градиентный спуск и квантовый SVM, могут существенно ускорить обучение моделей и повысить точность предсказаний. Исследования показывают, что эмулированные версии этих алгоритмов демонстрируют значительное улучшение производительности по сравнению с классическими методами. Элементы квантовых алгоритмов машинного обучения используются в таких сферах, как машинное зрение [5].

4. *Защита данных в видеоинформационных системах.* Квантовая криптография предлагает уникальные решения для защиты данных, особенно в контексте передачи видеопотоков. Протокол BB84, основанный на принципах квантовой механики, обеспечивает высокую степень безопасности благодаря невозможности перехвата информации без изменения состояния передаваемых фотонов. Эмулированные квантовые вычисления позволяют протестировать эти протоколы и интегрировать их в существующие видеоинформационные системы [6].

Заключение. Эмулированные квантовые вычисления в будущем представляют собой мощный инструмент для разработки и тестирования новых подходов в видеоинформационных технологиях. На данный момент направление эмулированных квантовых вычислений в отрасли обработки изображений только начинает развиваться и требует значительной доработки [7]. Примеры, рассмотренные в этой статье, демонстрируют широкий спектр применений, начиная от обработки изображений и заканчивая защитой данных. Хотя текущее состояние технологий еще не позволяет массово внедрять квантовые вычисления, исследования в области EQS закладывают основу для будущих инноваций и прорывов в этой области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвеев И.В. Актуальность внедрения курсов по квантовой связи и квантовой информатике // X Российская науч.-метод. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов: матер. конф. – Самара, 2022. – С. 88.
2. Тырышкин С.Ю. Квантовые вычисления и оптимизация: сравнительный анализ классических и квантовых алгоритмов // Оригинальные исследования. – 2024. – Т. 14, № 10. – С. 156–160.
3. Breast cancer diagnosis using support vector machine optimized by improved quantum inspired grey wolf optimization / A. Bilal, A. Imran, T.I. Baig, X. Liu, Nasr E. Abouel, H. Long // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – P. 10714.
4. Performance improvement of Lempel-Ziv-Welch compression algorithm / S.L. Frenkel, M. Kopeetsky, R. Molotkovsky, P. Borovsky // Informatics and Applications. – 2015. – Vol. 9, No. 4. – P. 78–84.
5. Covering the broad spectrum of intelligent systems: from neuromorphic engineering to robotics / B. Mostaghaci, F. Cuccureddu, H. Wang, M. Peterca, A. Poduval, E. Levy // Advanced Intelligent Systems. – 2023. – Vol. 5, No. 1.
6. Глозштейн Д.А. Организация защищенной системы видеоконференц-связи с использованием квантовой коммуникации / Д.А. Глозштейн, И.Г. Сидоркина // Вестник Поволжского гос. технол. ун-та. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2023. – № 2 (58). – С. 44–52.
7. Тырышкин С.Ю. Эмуляция квантовых вычислительных процессов для автоматизированных систем управления на классическом ПК // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. – 2024. – № 12. – С. 130–134.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМ ГИСТОГРАММ
НА УРОВЕНЬ РАЗМЫТИЯ ВИДЕОКАДРОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ В НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИНАХ**
*Е.В. Зайцева, доцент каф. информатики и компьютерных техно-
логий; А.В. Яковлев, студент каф. разработки и эксплуатации
нефтяных и газовых месторождений*
*г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II, Zaytseva_EV@pers.spmi.ru*

Описана особенность применения методов контрастирования к видеокадрам, полученным с глубинных телевизионных систем. Анализ произведен на основе видеокadra, полученного в глубинной газовой скважине. Рассмотрен метод эквализации гистограммы с использованием целевой гистограммы, а также рассчитаны количественные характеристики качества видеокadra.

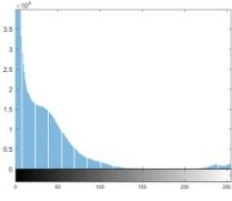
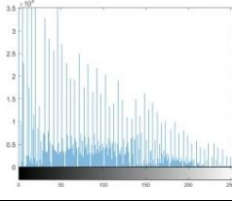
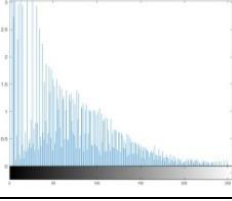
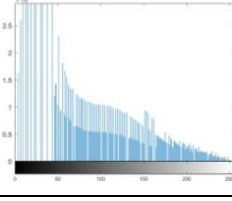
Ключевые слова: техническое зрение, автоматизированная система, глубинная телевизионная система, нефтяные и газовые скважины.

Глубинные телевизионные системы используются в нефтегазовой отрасли для исследования внутрискважинного пространства и оборудования. В некоторых случаях, таких как работа с мелкими повреждёнными частями погружного оборудования или с частями геофизического кабеля, визуальный анализ помогает быстрее и эффективнее устранить аварию. Телевизионные системы работают в сложных условиях. Во-первых, это высокая температура, большое давление, флюид, находящийся в скважине. Данную проблему решают конструкторы систем, которые подбирают соответствующее оборудование. Во-вторых, малое расстояние от объектива до объекта съёмки и низкая освещённость. Данные факторы приводят к получению смазанных, затемнённых изображений, анализ которых является затруднительным. В данной работе исследуется влияние метода эквализации гистограммы на качество получаемых видеокadres [1].

В работе произведен анализ видеокadra (таблица), полученного с помощью глубинной телевизионной видеосистемы на трехжильном каротажном кабеле для исследований нефтяных, газовых и гидрогеологических скважин (производитель – ООО ПФ «Аленд»).

Чтобы объективно оценивать изображения, введём понятия средней яркости по видеокadру (L) и Tenengrad (T) [2, 3]. Последний параметр основан на оценке среднего квадрата градиента яркости пикселей монохромного изображения. Его повышение является мерой уменьшения размытия и увеличения чёткости видеокadra.

Видеокадры и их количественные характеристики

Название	Видеокадр	Гистограмма	Количественные характеристики
Оригинальный видеокадр			$L=29,76$ $T=111,62$
HSV, $4 * \text{meanV}$			$L = 75,28$ $T = 150,70$
HSV, $f(x)$			$L = 62,58$ $T = 147,58$
RGB, $4 * \text{meanV}$			$L = 85,37$ $T = 150,42$

Оригинальный кадр затемнён по центру и с краёв. На гистограмме видим преобладание чёрных пикселей и смещение влево всей гистограммы. Для улучшения будем использовать эквализацию с целевой гистограммой. Рассмотрим три типа обработки. В первом зададим гистограмму как массив от среднего значения по каналу V (meanV) изображения HSV, умноженного на 4, до 0 с шагом – 0,01. В ходе экспериментов с целевыми диаграммами выбранная диаграмма дала наилучший количественный результат.

После эквализации видим выравнивание гистограммы по всей длине, уменьшение количества тёмных пикселей. По количественным характеристикам фиксируем увеличение яркости более чем в 2,5 раза, чёткость возросла в 1,3 раза. Визуально центр и края изображения стали светлее, там стали лучше видны детали. Также можно заметить шумы, которые появились в центральной части изображения. Было выявлено, что чем больше гистограмма смещается пиками в правую сторону, тем больше шумов образуется.

Второй тип обработки похож на первый, однако отличается от него видом целевой гистограммы. Зададим её как $f(x) = e^{-x^2}$, где x – массив от 0 до среднего значения по каналу V изображения HSV, умноженного на 4. Данный метод показывает количественные характеристики несколько хуже, однако визуально наблюдаем снижение шумов.

Третий тип – это обработка изображения RGB по каждому отдельному каналу (целевая гистограмма, как в первом варианте). Видим, что в этом случае яркость кадра будет больше, однако появляются дополнительные шумы.

Визуальный анализ видеок кадров (см. таблицу) показывает незначительное смещение в сторону зелёного спектра при работе с каналом, поэтому имеет смысл отдать предпочтение обработке по каналам RGB. Планируется продолжить исследование различных форм гистограмм при использовании данного метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцева Е.В. Подходы к цифровой обработке изображений в горной промышленности / Е.В. Зайцева, А.А. Кочнева, Е.В. Катунцов, М.Р. Киба // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13, № 1(65). – С. 62–67.
2. Сидоренко А.С. Методы фокусировки фотоустройств для улучшения качества изображений / А.С. Сидоренко, Н.Н. Гринченко // Методы и средства обработки и хранения информации: межвузовский сборник науч. тр. – Рязань, 2019. – С. 16–20.
3. Построение алгоритмов оптического контроля малоразмерных удаленных световых объектов / В.Е. Махов и др. // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24, № 6. – С. 15–27.

ОБУЧЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D-ВИДЕОДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ХИРУРГИЧЕСКИХ ИНСТРУМЕНТОВ DA VINCI

С.А. Забуга, аспирант каф. ТУ

*Научный руководитель В.В. Капустин, доцент каф. ТУ, к.т.н.
г. Томск, TVCVP, sergei.a.zabuga@tusur.ru*

Рассматриваются тренировка и тестирование нейронной сети, созданной на базе размеченного датасета 3D-видеоданных хирургических операций. Разработанная нейронная сеть используется для расчета пройденного пути хирургическими инструментами робот-ассистирующей системы da Vinci.

Ключевые слова: датасет, YOLO, da Vinci, хирургические инструменты, нейронная сеть.

Объектом исследования является нейронная сеть, натренированная на 3D-видеоданных, для применения ее в разработанной программе расчета пройденного пути хирургическими инструментами [1]. Цель работы – оценить полученную нейронную сеть детекции, классификации и определения опорных точек хирургических инструментов, а также оценить возможные пути улучшения качества полученной нейронной сети.

На основе размеченного датасета, а также предобученной нейронной сети YOLOv8x-pose-r6, имеющей 99,1 млн параметров [2], была натренирована модель классификации и нахождения опорных точек хирургических инструментов. Выбор предобученной нейронной сети обусловлен повышенными требованиями к разрешению видеок кадров, так как данная нейронная сеть обучена на изображениях с разрешением 1280×1280 элементов, а видеок кадры, поступающие с робот-ассистирующей системы da Vinci, имеют разрешение 1280x1024 элементов.

Датасет на момент тренировки составлял 54 видеозаписи операций. В общей сложности были размечены 76 081 кадра и 159 285 инструментов. Процентное соотношение размеченных инструментов: Fenestrated Bipolar Forceps (биполярные щипцы – 39%); ProGrapsForceps (щипцы ProGraps – 17%); Monopoles Curved Scissors (изогнутые ножницы – 32%); Large Needle Driver (иглодержатель – 12%).

Было произведено тестирование нейронной сети на специальной тестовой выборке, где 10% размеченного датасета не участвовало в

процессе тренировки. Нормированная матрица запутанности (англ. Normalized Confusion Matrix), изображенная в таблице, представляет собой нормированную версию матрицы запутанности. Она дает подробное представление о результатах, показывая количество истинно положительных, истинно отрицательных, ложноположительных и ложноотрицательных результатов для каждого класса и представляет данные в виде пропорций, а не абсолютных подсчетов. Такой формат упрощает сравнение производительности между классами.

Нормированная матрица запутанности

Предсказано	Fenestrated Bipolar Forceps	0,64	0,01	–	–	0,64
	ProGraps	–	0,48	–	–	0,16
	Monopoles Curved Scissors	–	–	0,75	–	0,11
	Large Needle Driver	–	–	–	0,75	0,09
	Фон	0,35	0,51	0,25	0,24	–
		Fenestrated Bipolar Forceps	ProGraps	Monopoles Curved Scissors	Large Needle Driver	Фон
Правда						

Так как в задаче детекции хирургических инструментов мы можем пренебречь уверенностью определения, поскольку в сцене операции находятся только инструменты из перечисленного ранее списка, основными метриками оценки точности являются точность (англ. precision), полнота (англ. recall) и mAP (среднее значение точности) при нескольких пороговых значениях IoU от 0,5 до 0,95 с шагом 0,05. Метрика precision является долей правильно предсказанных положительных прогнозов среди извлеченных прогнозов, в свою очередь, метрика recall является долей правильно предсказанных положительных прогнозов среди релевантных предсказаний, содержащих в себе ложноотрицательные и правильно положительные события. Метрика mAP вычисляет среднюю точность по нескольким классам и определяет общую производительность модели обнаружения объектов [3].

На рис. 1 изображены значения полученных метрик при тестировании. «B» и «P» разделяют метрики для определения границ объекта (BOX) и определения опорных точек объекта (POSE) соответственно.

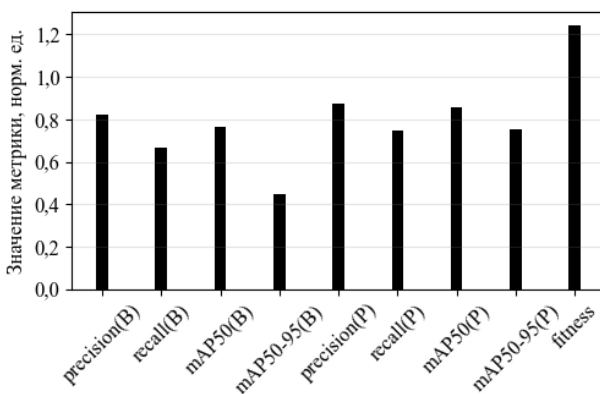


Рис. 1. График метрик нейронной сети

Натренированная нейронная модель хорошо справляется с классификацией и нахождением опорных точек хирургических инструментов, что критически важно для подсчета их пути. Из матриц запутанности, а также метрик хорошо видно, что главная трудность, с которой сталкивается модель на данном этапе, это детекция инструмента в кадре. Из этого можно сделать вывод, что именно улучшение детекции хирургических инструментов будет приоритетом для дальнейшего улучшения точности определения пройденного пути инструментами.

Возможными путями улучшения нейронной сети являются расширение датасета, изменение аугментационных параметров, обучение части модели, отвечающей за детекцию отдельно от определения позиции (ключевых точек и их взаимосвязи), и уточнение ограничивающих прямоугольников границ объекта датасета.

Исследование выполнено в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», стратегического проекта № 4 «Биомед», проекта № 64, от «21» марта 2024 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2024688006 «medHUD: анализатор динамики эндоскопических операций». Авторы: С.А. Забуга, И.Д. Мусихин, В.В. Капустин и др. Заявка № 2024687688. Дата поступления 19 декабря 2024. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.11.2024 г.
2. Официальный сайт Ultralytics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ultralytics.com/ru>, свободный (дата обращения: 11.03.2025).
3. Boyd K. Area under the Precision-Recall Curve: Point Estimates and Confidence Intervals / K. Boyd, K.H. Eng, C.D. Page // Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. – 2013. – Vol. 8190. – P. 451–466.

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИНЕРОВСКОЙ
ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ
СМАЗАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С БПЛА**

Ч.Х. Фан, аспирант; А.С. Захлебин, доцент каф. ТУ, к.т.н.;

М.И. Курячий, проф. каф. ТУ, с.н.с., к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, phantrunghie091099@gmail.com

Представлен результат оценки эффективности фильтрации изображений методом Винера, искаженных смазом. Смаз возникает в результате увеличенного времени экспозиции при формировании изображения во время полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА) из-за недостаточной освещенности или при высокой скорости и низкой высоте полета. В рамках исследования проведены авиационные работы с целью получения изображений с различными параметрами экспозиции. Проведена оценка эффективности фильтра Винера при восстановлении полученных изображений.

Ключевые слова: БПЛА, фильтр Винера, экспозиция, смаз, контраст.

При выполнении авиационных работ в некоторых случаях формируются изображения, искаженные смазом. Это объясняется следующими причинами: сенсор камеры со скользящем затвором, недостаточно короткое время экспозиции, высокая скорость и малая высота полета БПЛА и т.д. Для восстановления искаженных изображений существует много методов, применение которых зависит от вида искажения. В данной работе рассмотрено применение метода винеровской фильтрации при восстановлении изображений, искаженных смазом, при недостаточно коротком времени экспозиции.

В рамках подготовки экспериментальных данных для исследования были выполнены авиационные работы в количестве пяти полетов БПЛА при неизменных высоте, скорости полета, заданном маршруте и других параметрах, при этом изменялось лишь время экспонирования матрицы, от 1/50 до 1/2 с. Априорная информация о параметрах полета и фотографирования: скорость полета – 9 м/с; высота полета – 100 м; размер кадра – 3648×5472 пикселей; фокусное расстояние – 8,8 мм/24 мм; размер матрицы – 13,2×8,8 мм; угол обзора – 84°.

При использовании фильтра Винера необходимо определить функцию рассеяния точки (ФРТ), точность вычисления которой влияет на эффективность работы фильтра. В данном случае ФРТ возможно смоделировать, используя два компонента. Первым компонентом является направление перемещения камеры относительно горизонтальной строки матрицы камеры, а вторым – расстояние, пройденное

БПЛА за один цикл экспозиции, выраженное в пикселях. Для определения первого компонента ФРТ следует использовать датчик угла рыскания БПЛА либо анализировать след объекта в смазанных изображениях. Исходя из вышеуказанной априорной информации: параметров матрицы камеры; параметров фотографирования; параметров полета БПЛА, возможно определить второй компонент для моделирования ФРТ [1] (результат представлен в табл. 1).

Таблица 1

Результат вычисления расстояния, пройденного БПЛА за 1 цикл экспозиции

Время экспозиции, с	1/50	1/25	1/10	1/5	1/2
Расстояние, пройденное БПЛА, пиксель	6,67	13,33	33,33	66,67	166,67

На следующем этапе была проведена фильтрация изображений с помощью ПО MatLab. При этом использовалась встроенная функция в библиотеке Image Processing Toolbox. Аргументами для обработки изображения являются моделируемая ФРТ и отношение сигнал/шум. Значение отношения сигнал/шум было подобрано так, чтобы обеспечить наилучшее качество восстановления изображения [2]. После обработки для оценки эффективности фильтрации была выбрана дорожная разметка в качестве объекта интереса. Результаты восстановления изображений представлены на рис. 1.

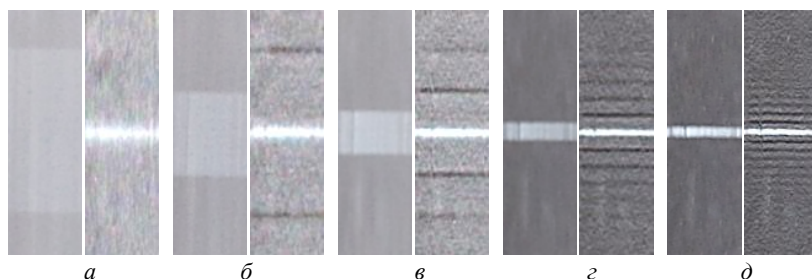


Рис. 1. Смазанные (слева) и восстановленные (справа) изображения при времени экспозиции: $a - 1/2$ с; $б - 1/5$ с; $в - 1/10$ с; $г - 1/25$ с; $д - 1/50$ с

При визуальной оценке изображений можно сделать вывод, что в обработанных изображениях была восстановлена дорожная разметка, размер и яркость которой приблизились к реальной, но в фоне этих изображений появлялись шумы и артефакты фильтрации.

Далее была проведена количественная оценка качества восстановления изображений. Вследствие неравномерной структуры асфальта и дорожной разметки проводился анализ профиля яркости 30 соседних линий изображения, а затем было рассчитано среднее значение

ние яркости множества соответствующих пикселей этих линий. Результаты представлены на рис. 2.

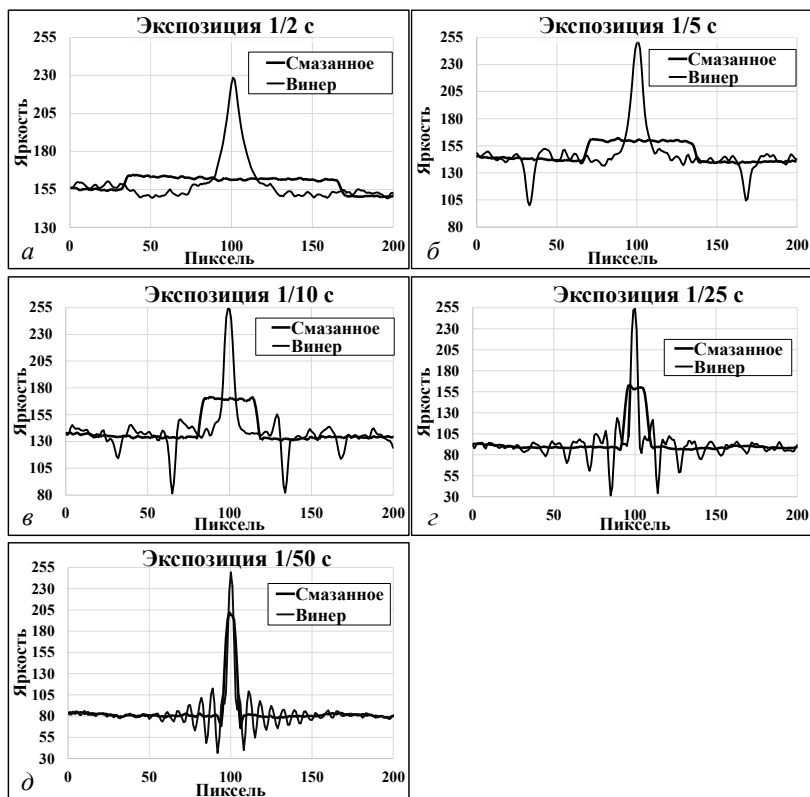


Рис. 2. Профили яркости объекта интереса в восстановленных изображениях при различных значениях экспозиций

Рассмотренные изображения имеют особенность: дорожная разметка на изображениях имеет малый размер на большом равномерном фоне, т.е., средняя яркость изображения примерно равна средней яркости фона. В данном случае для оценки контраста изображений необходимо использовать коэффициент контраста Вебера [3], который равен

$$K = (I_{об} - I_{фон}) / I_{фон} ,$$

где $I_{об}$ – средняя яркость объекта; $I_{фон}$ – средняя яркость фона.

Результаты анализа изображений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты анализа изображений

Характеристика	Экспозиция, с									
	1/2		1/5		1/10		1/25		1/50	
	Смазанное	Винер	Смазанное	Винер	Смазанное	Винер	Смазанное	Винер	Смазанное	Винер
Средняя яркость объекта	164,5	171,9	158,4	186,2	164,9	204,1	148,2	182,0	176,5	208,6
Средняя яркость фона	152,8	153,5	141,5	141,3	134,2	134,7	89	88,8	80,7	80,8
Коэффициент контраста	0,06	0,12	0,12	0,32	0,23	0,52	0,67	1,05	1,19	1,58
Повышение контрастности	2,04		2,66		2,25		1,58		1,33	

Из табл. 2 видно, что после восстановления смазанных изображений винеровским фильтром контраст изображений повышается в 1,33–2,66 раза. Из результатов исследований подтверждается эффективность работы фильтра Винера при восстановлении изображений, искаженных смазом, в результате увеличенного времени экспозиции при формировании изображения во время полета БПЛА из-за недостаточной освещенности или при высокой скорости и низкой высоте полета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Повышение контраста и точности локализации объектов интереса на ортофотопланах местности, построенных по искаженным изображениям с беспилотного летательного аппарата / А.С. Захлебн, М.И. Курячий, В.В. Капустин, А.В. Каменский, А.К. Мовчан // Омский научный вестник. – 2024. – № 1 (189). – С. 119–126. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-119-126.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MatLab / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
3. Peli E. contrast in complex images // Journal of the optical society of America. – 1990. – Vol. 7, No. 10. – P. 2032–2040. DOI: <https://doi.org/10.1364/Josaa.7.002032>.

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 004.7

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ MQTT-КЛИЕНТОВ

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

*Научный руководитель Е.А. Потапова, ст. преп. каф. КСУП
Проект ГПО КСУП-1904. Разработка приложений для Android
г. Томск, ТУСУР, anton.ryazanov.main@gmail.com*

Представлен сравнительный анализ популярных MQTT-клиентов. Исследование охватывает ключевые характеристики данных решений, такие как функциональность, производительность, безопасность, кроссплатформенность и условия лицензирования.

Ключевые слова: MQTT, IoT, протокол обмена сообщениями, Eclipse Paho, Mosquitto, EMQX.

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) является легковесным протоколом обмена сообщениями, который широко используется в среде интернета вещей (IoT), мобильных приложениях и других системах с ограниченными ресурсами [1]. Данный протокол работает на основе модели «публикация-подписка» и обеспечивает эффективную доставку данных между устройствами.

При сравнении MQTT-клиентов основное внимание уделялось поддержке версий протокола (от 3.1 до 5.0), функциональным возможностям, производительности и масштабируемости, а также безопасности с использованием TLS/SSL и современных методов аутентификации. Кроме того, анализировались кроссплатформенность, качество документации и активность сообщества, а также вопросы стоимости.

Были выбраны такие MQTT-клиенты: Eclipse Paho, Mosquitto, EMQX

Eclipse Paho – это коллекция MQTT-библиотек, поддерживающих версии 3.1, 3.1.1 и 5.0, реализованные на Java, C/C++, Python, JavaScript и Go с поддержкой QoS 0-2, TLS/SSL и лицензией Eclipse Public License [2].

Mosquitto – проект с открытым исходным кодом от Eclipse Foundation, включающий брокер, клиентские библиотеки и CLI-инструменты, поддерживающий MQTT 3.1, 3.1.1 и 5.0, WebSockets, TLS/SSL и аутентификацию, лицензируемый по EPL/EDL и оптимизированный для IoT и встраиваемых систем благодаря своей легковесности [3].

EMQX – высокопроизводительный MQTT-брокер от EMQ, поддерживающий версии 3.1, 3.1.1 и 5.0, с клиентскими SDK для Erlang, Go, Python, Java и JavaScript, обеспечивающий масштабируемость, расширенную маршрутизацию, шифрование и аутентификацию, распространяемый под лицензией Apache 2.0 и оптимальный для IoT-решений с миллионами подключений [4].

Ниже представлена таблица сравнения всех характеристик выбранных клиентов.

Сравнение обозреваемых инструментов прототипирования

Клиент	Версия MQTT	Языки	Производительность (сообщения/с)	Лицензия
Eclipse Paho	3.1, 3.1.1, 5.0	Java, C/C++, Python, JavaScript, Go	До 10 тыс.	Eclipse Public License
Mosquitto	3.1, 3.1.1, 5.0	C (ядро) с обёртками для других языков; CLI-инструменты	До 50 тыс.	EPL/EDL
EMQX	3.1, 3.1.1, 5.0	Клиентские SDK для Erlang, Go, Python, Java, JavaScript	До 10 млн.	Apache 2.0

На основе представленной таблицы можно сделать следующие рекомендации по выбору MQTT-клиента.

Если требуется поддержка множества языков и платформ с надежной и стабильной работой, а нагрузка по сообщениям умеренная (до 10 тыс. сообщений/с), предпочтительнее использовать Eclipse Paho. Это решение отлично подходит для корпоративных приложений, где важны качественная документация и активное сообщество.

Если приоритетом являются легковесность, оптимизация для устройств с ограниченными ресурсами и возможность работы с WebSockets, стоит обратить внимание на Mosquitto. Благодаря своей эффективности и возможности обрабатывать до 50 тыс. сообщений/с Mosquitto хорошо подходит для IoT-устройств и встраиваемых систем.

Для крупных IoT-решений, где необходимы максимальная производительность и масштабируемость (до 10 млн сообщений/с), лучшим выбором будет EMQX. Это решение обеспечивает расширенные возможности маршрутизации, высокую надежность и встроенную поддержку шифрования, что делает его идеальным для систем с большим количеством подключений и высокими требованиями к обработке данных.

В статье приведён сравнительный анализ MQTT-клиентов, каждый из которых имеет свои сильные стороны и оптимальные области применения. Выбор клиента должен основываться на требованиях проекта, таких как производительность, безопасность, интеграция с существующими системами и технологическим стеком. EMQX благодаря высокой производительности и масштабируемости особенно подходит для крупных корпоративных IoT-решений, в то время как Eclipse Paho и Mosquitto могут быть оптимальными для простых приложений или устройств с ограниченными ресурсами.

ЛИТЕРАТУРА

1. MQTT.org. MQTT Essentials [Электронный ресурс] // MQTT.org. – 2025. – URL: <http://mqtt.org/> (дата обращения: 14.03.2025).
2. Eclipse Foundation. Eclipse Paho Project: MQTT Client Libraries [Электронный ресурс] // Eclipse Foundation. – 2025. – URL: <https://www.eclipse.org/paho/> (дата обращения: 14.03.2025).
3. Mosquitto. Mosquitto: The Open Source MQTT Broker [Электронный ресурс] // Mosquitto. – 2025. – URL: <https://mosquitto.org/> (дата обращения: 14.03.2025).
4. EMQ. EMQX – Enterprise MQTT Broker [Электронный ресурс] // EMQ. – 2025. – URL: <https://www.emqx.com/> (дата обращения: 14.03.2025).

УДК 621.396.41

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ ДЛЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Д.Е. Ильинский, С.А. Еремеев, студенты;

Я.В. Крюков, доцент каф. ТОР, к.т.н.

г. Томск, TUSCP, dmitriyilinskiy02@gmail.com

Реконфигурируемая интеллектуальная поверхность является прорывной технологией физического уровня для беспроводных систем связи. Она представляет собой плоскую поверхность из двумерного массива элементарных ячеек, которая позволяет формировать диаграмму направленности для отраженного от поверхности радиосигнала. Работа посвящена разработке и измерению собственной би-

нарной элементарной ячейки для несущей частоты 2,4 ГГц, выполненной в виде патч-антенны.

Ключевые слова: реконфигурируемая интеллектуальная поверхность, элементарная ячейка, патч-антенна.

Современные беспроводные системы связи сталкиваются с возрастающими требованиями к скорости передачи данных и эффективности использования спектра. Основными причинами этого являются увеличение числа подключаемых устройств, а также внедрение новых приложений и сервисов. Для удовлетворения этих требований необходимо применение новых технологий физического уровня. Одним из перспективных решений является использование реконфигурируемой интеллектуальной поверхности (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS), которая представляет собой двумерный массив управляемых элементарных ячеек. Эти ячейки могут динамически изменять амплитуду и фазу отражаемого электромагнитного сигнала, что позволяет формировать диаграмму направленности для отраженного от поверхности RIS сигнала.

Целью работы является разработка, изготовление и измерение элементарной ячейки RIS с двумя фазовыми состояниями для несущей частоты 2,4 ГГц. В качестве опорного материала использованы публикации коллектива А.И. Пойда, К.А. Глинского, А.С. Тярина (например, [1]), который работает в направлении RIS. Для простоты конструкции ячейка RIS выполнена в виде прямоугольной патч-антенны. Управление фазой реализовано с помощью pиn-диода BAR6302VN6327. Для измерения S-параметров предусмотрен вывод с разъемом SMA, согласованный на 50 Ом. В качестве диэлектрика используется материал FR-4 толщиной 1,5 мм.

На рис. 1 приведена конструкция разработанной элементарной ячейки вместе с ожидаемыми коэффициентом отражения и фазо-частотной характеристикой (ФЧХ). В контексте RIS коэффициент отражения показывает величину электромагнитной энергии, которая отражается от поверхности элементарной ячейки и излучается в сторону приемника. ФЧХ показывает возможность управления фазой отраженного сигнала для аналогового диаграммобразования отраженного сигнала в сторону приемника. Видно, что на целевой частоте 2,4 ГГц выключенный pиn-диод обеспечивает изменение фазы отраженного сигнала на $+73^\circ$, в то время как его включение дает изменение фазы на -103° . Общее изменение фазы составляет 176° .

Для измерения S-параметров изготовленной антенны использован векторный анализатор цепей ARINST. Для изменения состояния pиn-диода на него с помощью тройника смещения Picosecond подается

прямое напряжение с источника питания. Фото измерительного стенда приведено на рис. 2. На этом же рисунке показан коэффициент отражения при включенном и выключенном диоде.

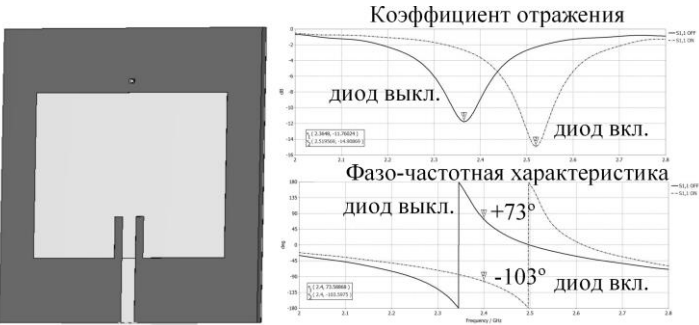


Рис. 1. Конструкция и параметры элементарной ячейки

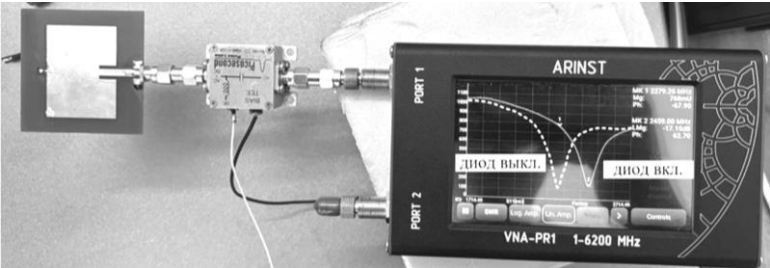


Рис. 2. Фото экспериментального стенда и результатов измерения коэффициента отражения

На рис. 3 приведена измеренная ФЧХ изготовленной элементарной ячейки.

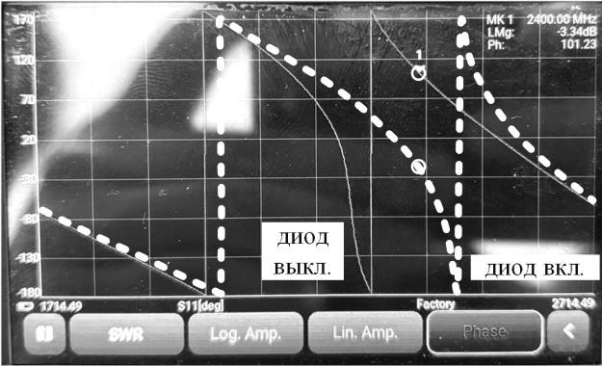


Рис. 3. Фото результатов измерения ФЧХ

На частоте 2,4 ГГц ячейка позволяет внести фазовый сдвиг $+101^\circ$ и -17° при выключенном и включенном pin-диоде соответственно. Общее изменение фазы составляет 118° . Отличие от рассчитанных в модели характеристик обусловлено погрешностью диэлектрической проницаемости, допущенной при изготовлении патч-антенны. Этот фактор будет учтен в дальнейшем при разработке поверхности.

Работа выполнена при поддержке УМНИК-24 (Электроника III) / 11.1 РЭА для телекоммуникационного оборудования, договор 40ГУЭС18/101325.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальное исследование реконфигурируемых интеллектуальных поверхностей с обратной связью от пользовательских устройств / А.И. Пойда, К.А. Глинский, А.А. Куреев, Е.М. Хоров // Информационные процессы. – 2023. – Т. 23, №. 4. – С. 600–611.

УДК 621.396

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛА ПО ПРЕАМБУЛЕ НА ПЛИС

Р.А. Порваткин, студент

*Научный руководитель Е.В. Рогожников, доцент каф. ПИШ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, porvatkin2001@gmail.com*

Представлены результаты разработки алгоритма детектирования сигнала PRACH стандарта GSM 900 на программируемой логической интегральной схеме. Улучшен разработанный ранее метод в MatLab, а также проведено испытание на реальном устройстве ПЛИС. Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности разработанного алгоритма на реальном устройстве. Также получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024688482 [1].

Ключевые слова: корреляция, ПЛИС, сигнал, шум, ложная тревога, порог, моделирование.

В радиолокационных и коммуникационных системах может быть ситуация, когда исследователь получает либо сигнал, на который воздействует шум, либо сталкивается только с шумом. Задача состоит в том, чтобы, используя определенный алгоритм обнаружения сигнала, выбрать правильное решение по полученным данным о наличии или отсутствии сигнала [2]. Разработка алгоритма проводилась в качестве продолжения предыдущей работы [3]. Благодаря текущим наработкам с помощью программируемых логических интегральных схем (далее –

ПЛИС) можно определить наличие или отсутствие полезного сигнала в приемопередающем тракте.

Модель разработана для обнаружения преамбулы, передающейся по каналу случайного доступа стандарта GSM 900 с помощью ПЛИС. Алгоритм детектирования позволяет установить наличие или отсутствие полезного сигнала, при этом принятое решение о наличии сигнала служит основным критерием оценки рабочих характеристик системы.

Данная работа проводилась на отладочной плате DE10-Standard, использующей Cyclone V.

Разработанный ранее алгоритм принятия решения о наличии или отсутствии сигнала оказался не эффективен для применения с реальным сигналом. Он имел большое количество ложных срабатываний из-за отсутствия адаптивности [3].

Поэтому для реального сигнала был разработан алгоритм выбора порога корреляции, благодаря которому можно было бы иметь минимальное количество ложных срабатываний и пропусков сигналов, а также максимальный процент детектирования полезного сигнала.

Для этого вместо расчета среднего значения результатов корреляции был выбран новый способ, а именно фильтр скользящего среднего, благодаря чему рассчитывается значение порога для каждых 100 символов, а не для всего массива сразу.

$$y(n) = W \cdot \left(\frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} x(n-i) \right), \quad (1)$$

где $x(n)$ – входной сигнал фильтра; $y(n)$ – выходной сигнал; M – порядок фильтра; W – коэффициент корреляции, который подбирается экспериментальным путем.

Также экспериментальным путем был выбран коэффициент (W), на который нужно умножить значения после фильтра. Оптимальный коэффициент равен 6,1. В результате формируется алгоритм, включающий механизм скользящего среднего в качестве фильтра, куда приходят значения корреляции, после чего благодаря фильтру рассчитываются средние значения для каждых 100 символов массива отдельно, после чего происходит умножение на ранее полученный коэффициент. В результате получается порог корреляции, который адаптируется к корреляционной последовательности. Результат корреляции представлен на рис. 1.

Следующим шагом была проверка алгоритма в программном обеспечении «ModelSim». Также для определения момента, когда результат корреляции больше адаптивного порога корреляции, выведен

сигнал «strob». Пример работы коррелятора с порогом можно наблюдать на рис. 2.

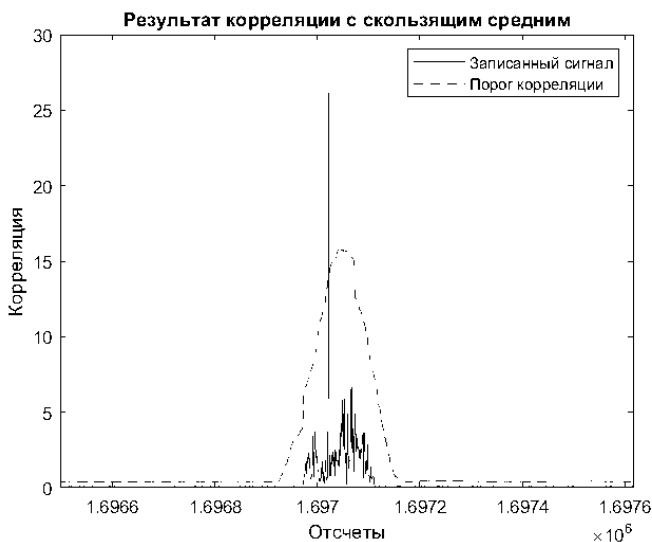


Рис. 1. Пример работы алгоритма и принятия решения



Рис. 2. Результат работы коррелятора с адаптивным порогом

Выход «strob» сигнализирует о наличии или отсутствии сигнала в каждый момент времени срабатывания «clk», где «strob = 1» означает, что результат корреляции больше порога, а «strob = 0» означает, что порог не пересечен. Параметр «filter» показывает значения порога корреляции, а «main_out» представляет собой выход коррелятора.

Далее алгоритм повторно был протестирован на отладочной плате ПЛИС, где в результате работы алгоритма были зафиксированы значения, идентичные полученным ранее в программном обеспечении «ModelSim». На вход коррелятора подавалась последовательность с генератора сигналов, а к отладочной плате был добавлен модуль для

аналого-цифрового преобразования. Результаты работы алгоритма на реальном оборудовании представлены на рис. 3.

Type	Alias	Name	1776	Value	77	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
IO	strob		0																
IO	* count[15:0]		7	51	52	53	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
IO	* count[16:0]		145124	153198	151200	150560	148820	144474	144138	143894	143910	146136	145704	226560	226218				
IO	* count[main_out[31:0]		576	31894	3364	29890	1156	853941	4	24864	484	13824	196	576	5776	3216			

Рис. 3. Результат моделирования на отладочной плате ПЛИС

Количество затраченных ресурсов на ПЛИС приведено на рис. 4.

Logic utilization (in ALMs)	2,862 / 41,910 { 7 % }
Total registers	7771
Total pins	68 / 499 { 14 % }
Total virtual pins	0
Total block memory bits	20,736 / 5,662,720 { < 1 % }
Total DSP Blocks	109 / 112 { 97 % }
Total HSSI RX PCSs	0 / 9 { 0 % }
Total HSSI PMA RX Deserializers	0 / 9 { 0 % }
Total HSSI TX PCSs	0 / 9 { 0 % }
Total HSSI PMA TX Serializers	0 / 9 { 0 % }
Total PLLs	0 / 15 { 0 % }
Total DLLs	0 / 4 { 0 % }

Рис. 4. Количество затраченных ресурсов

В данной работе был разработан алгоритм детектирования преамбулы, передающейся по каналу случайного доступа сигнала стандарта GSM 900, а также описан на языке Verilog HDL, который на основе корреляционного анализа принятого сигнала определял, является ли найденный сигнал полезным или нет. По результатам моделирования алгоритм выполнял все поставленные требования.

После тестирования алгоритма на отладочной плате ПЛИС было подтверждено, что он правильно выполняет свои функции и надежно определяет наличие или отсутствие полезного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2024688482. Программное обеспечение для детектирования PRACH сигнала 2024 / Р.А. Порваткин, И.В. Гридин, Н.А. Иванников и др. – Заявка № 2024688150. Дата поступления 23 ноября 2024 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 28 ноября 2024 г.

2. Акимов П.С. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов, П.А. Бакут, В.А. Богданович. – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.

3. Порваткин Р.А. Разработка модели обнаружения PRACH-сигнала GSM 900 // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР: в 3 ч. – Томск: В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева); ТУСУР, 2024. – Ч. 1. – С. 121–124.

УДК 621.396.61

МОДЕЛЬ АНАЛОГОВОГО ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА ДЛЯ ПОРТАТИВНОЙ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ LTE

С.А. Наумов, студент ПИШ;

Е.В. Rogozhnikov, доцент каф. ПИШ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, naumov.s.914-m@e.tusur.ru,

evgenii.v.rogozhnikov@tusur.ru

Представлен процесс построения модели аналогового передающего тракта для портативной базовой станции LTE, обеспечивающей сеть радиодоступа в радиусе одного километра. Рассмотрена зависимость дальности работы от значения излучаемой мощности. Собрана модель передающего тракта, обеспечивающего требуемую дальность. Оценено значение амплитуды вектора ошибок для проверки соответствия стандарту LTE.

Ключевые слова: передающий тракт, модель, LTE, OFDM, 3GPP, MatLab, AWR DE, IQ-созвездия.

При проектировании радиоустройств часто возникает необходимость быстро оценить влияние замены того или иного компонента на отклик системы в целом, что не всегда можно сделать аналитически, так как, например, в случае с нелинейными элементами сложность расчетов увеличивается в разы. В таком случае приходят к использованию основанных на математическом моделировании систем автоматизированного проектирования САПР.

В данной работе САПР используется для создания топологии передающего тракта, обеспечивающего работу базовой станции в радиусе километра. Одним из факторов, определяющих дальность системы, является значение мощности излучения передатчика.

Приближенную оценку необходимой мощности для обеспечения приема сигнала отвечающим стандарту LTE release 15 3GPP пользовательским оборудованием [1] с требуемой дальностью можно получить с помощью выраженной через децибелы упрощенной формулы Фрииса (1) [2]:

$$P_{\text{перед}} = P_{\text{прием}} - G_{\text{перед}} - G_{\text{прием}} - 20 \log_{10} \left(\frac{c}{4\pi r f_B} \right), \quad (1)$$

где $P_{\text{перед}}$ – мощность излучения передатчика базовой станции; $P_{\text{прием}}$ – пороговая чувствительность приемника E-UTRA Band 5 пользовательского оборудования; $G_{\text{перед}}$ – коэффициент усиления передающей антенны станции; $G_{\text{прием}}$ – коэффициент усиления приемной антенны пользовательского оборудования; c – скорость света в вакууме, r – расстояние между пользовательским оборудованием и базовой станцией, f_v – верхняя частота полосы сигнала на радиочастоте.

При пороговой чувствительности приемника пользовательского оборудования $P_{\text{прием}} = -91$ дБм, коэффициентах усиления антенн $G_{\text{перед}} = G_{\text{прием}} = 3$ дБ и верхней частоте полосы пропускания канала $f_v = 891,5$ мГц, согласно формуле (1), получим представленную на рис. 1 зависимость минимально требуемой мощности передатчика базовой станции $P_{\text{перед}}$ от расстояния r .

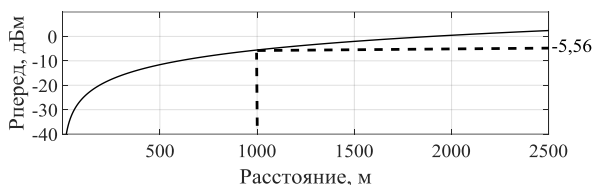


Рис. 1. Требование к мощности передатчика в зависимости от расстояния

Исходя из требований к мощности сигнала и требований к базовой станции, была составлена модель, имитирующая формирование, передачу и обработку сигнала OFDM [3] (рис. 2).

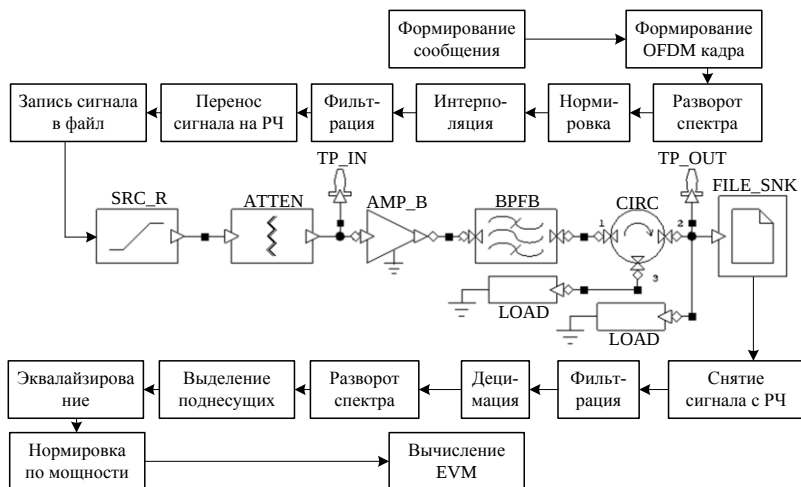


Рис. 2. Структурная схема модели передающего тракта

В соответствии со структурной схемой рис.2, в программной среде MatLab производится формирование OFDM-сигнала на радиочастоте для последующей записи в текстовый файл в качестве тестового сигнала.

В среде AWR DE имитируется прохождение сигнала через нелинейные устройства. Временные отсчеты OFDM-сигнала, считанные из файла с заданной частотой дискретизации, корректируются по уровню идеализированным аттенуатором, что позволяет выполнять частичную настройку сигнала без коррекции кода в MatLab. Далее сигнал проходит через модель малошумящего усилителя FLA-9K-3000-43-30 [4], где вносятся основные искажения в тракте, производится имитация прохождения сигнала через полосовой фильтр, где подавляются внеполосные излучения, и циркулятор, выполняющий роль антенного коммутатора для приемного и передающего трактов. Затем полученный сигнал записывается в файл.

Посредством пакета Visual System Simulator программной среды AWR design environment можно проследить за изменением уровня мощности на каждом из элементов (рис. 3).

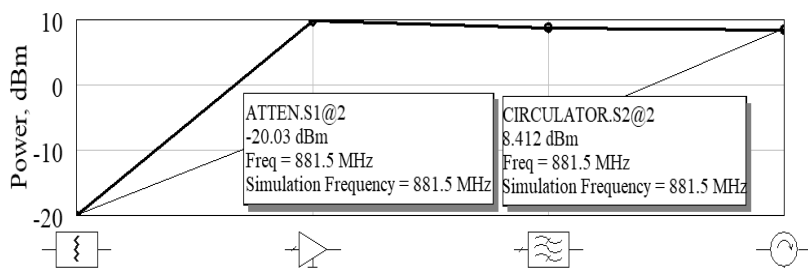


Рис. 3. График поэлементного изменения уровня мощности полезного сигнала

Как можно заметить из рис. 3, мощность сигнала на входе модели посредством аттенуатора приведена к уровню -20 дБм, затем моделью усилителя мощности к $9,7$ дБм. После потерь в фильтре и циркуляторе мощность опускается до уровня $8,4$ дБм, что отличается от рассчитанного ранее значения на 14 дБм. Это сделано из соображений необходимости запаса на замирания 10 дБм при использовании наземной радиосвязи и результатов предварительной имитации канала распространения сигнала в программе Radio Mobile, при которой препятствия ослабляющие сигнал, больше чем на 4 дБм встречались в менее 20% случаев при равнинном типе местности.

На рис. 4 отображены спектры сигналов на входе и выходе модели в точках TP_IN и TP_OUT соответственно.

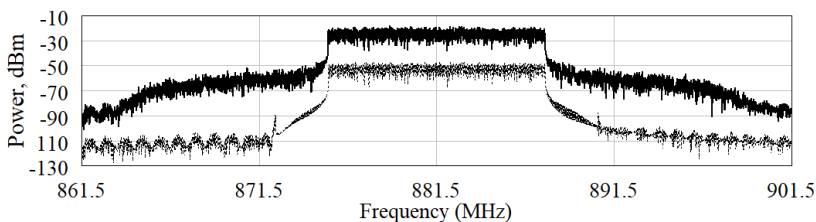


Рис. 4. Графики спектров мощности сигналов на входе (---) и выходе передатчика (—)

Как показано на рис. 2, сигнал на выходе модели записывается в файл и, затем обрабатывается в среде MatLab. Выполняются операции э обратные тем, что производились при формировании, и в дополнение эквалайзирование по пилотному символу, нормировка по мощности и вычисление амплитуды вектора ошибок.

После нормировки входного и выходного сигналов по значению средней мощности получим графики IQ-созвездий (рис. 5).

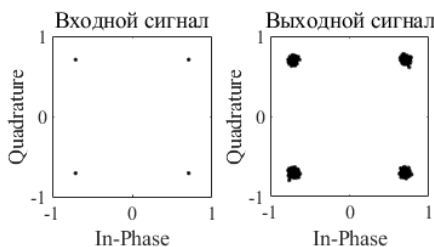


Рис. 5. IQ-созвездия входного и выходного сигналов

Среднее значение EVM для данной системы получилось равным 3,457% [5]. Такой уровень EVM, согласно спецификации 3GPP release 15 [3], допускает использование 256-QAM.

ЛИТЕРАТУРА

1. 3GPP TS 36.101 V15.24.0. User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 15) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.101/36101-f00.zip, свободный (дата обращения 20.02.2025).
2. Johnson R. Antenna Engineering Handbook (2nd ed.). – NY: McGraw-Hill, Inc., 1984. – P. 1–12.
3. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 15) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.104/36104-ff0.zip, свободный (дата обращения 20.02.2025).

4. Low Noise Amplifier FLA-9K-3000-43-30 datasheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.freflex.com/products/files/low-noise-amplifiers/FLA-9K-3000-43-30.pdf>, свободный (дата обращения: 20.02.2025).

5. Rishad A.S. On the Extended Relationships Among EVM, BER and SNR as Performance Metrics / A.S. Rishad, R. Shahriar, R.I. AHM // 4th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE). – IEEE, 2006. – P. 409–411.

УДК 621.396.1

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО ЛИНИИ ПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА БПЛА

К.В. Савенко, К.В. Диноченко, ассистенты каф. ТОР

г. Томск, ТУСУР, kirill.savenko@tusur.ru

Рассмотрено использование линии электропитания для передачи данных в системах беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Основное внимание уделено анализу канала связи, построенного на основе линий с распределенными параметрами, и влиянию выходной емкости фильтра источника питания и емкостной нагрузки на передачу сигнала. Проведено моделирование в Multisim, результаты которого показали значительное влияние емкости на затухание сигнала и частотно-селективные замирания.

Ключевые слова: линия электропитания, передача данных, беспилотный летательный аппарат, Multisim.

Беспилотные летательные аппараты широко используются для быстрого развертывания сетей связи и систем видеонаблюдения. Одной из ключевых задач при проектировании таких систем является обеспечение надежного канала связи между БПЛА и наземным пунктом управления. Традиционно для этого используются беспроводные каналы связи, однако они подвержены помехам и могут быть менее надежными в условиях сложной электромагнитной обстановки. В качестве альтернативы можно рассмотреть использование проводных каналов связи, что повышает надежность и помехозащищенность системы. Однако проводные каналы связи применимы только в случаях стационарного размещения БПЛА, когда аппарат закреплен на определенной высоте и не требует перемещения. При этом добавление дополнительных проводных линий связи увеличивает вес кабеля, что снижает грузоподъемность БПЛА. В связи с этим актуальным становится использование линий электропитания БПЛА для передачи данных [1].

Канал передачи данных по цепям питания постоянного тока можно представить как линию с распределенными параметрами. Для

двухпроводной линии питания постоянного тока выделяются следующие основные распределенные параметры: сопротивление линии (R), которое связано с потерями из-за сопротивления проводников; индуктивность линии (L), создающая реакцию на изменения тока, что может вызывать задержки в переходных процессах; емкость линии (C), возникающая между проводами и влияющая на накопление заряда, а также проводимость (G), описывающая потери, связанные с утечками тока через изоляцию проводников. Также важным параметром является волновое сопротивление линии передачи, которое описывает соотношение напряжения и тока в стационарном режиме распространения волн вдоль линии. Оно зависит от сопротивления, индуктивности, проводимости и емкости линии. Волновое сопротивление играет важную роль в согласовании линии с источником и нагрузкой для минимизации потерь сигнала и отражений [2].

Для анализа канала связи была создана модель в Multisim 14.2, которая включает в себя эквивалентную схему цепи развязки, состоящую из трансформатора и разделительного конденсатора.

В модель были внесены параметры исследуемого кабеля, такие как погонные сопротивление (7 мОм/м), индуктивность (410 нГн/м), емкость (95 пФ/м) и проводимость (1 нСм/м) [3]. Длина кабеля составила 185 м .

Для анализа влияния емкости на канал связи в модель были добавлены эквивалентные схемы электролитических и пленочных конденсаторов источника питания и входных цепей питания БПЛА [4].

Полученная модель представлена на рис. 1. В результате моделирования были получена частотная передаточная характеристика исследуемой линии связи, представленная на рис. 2.

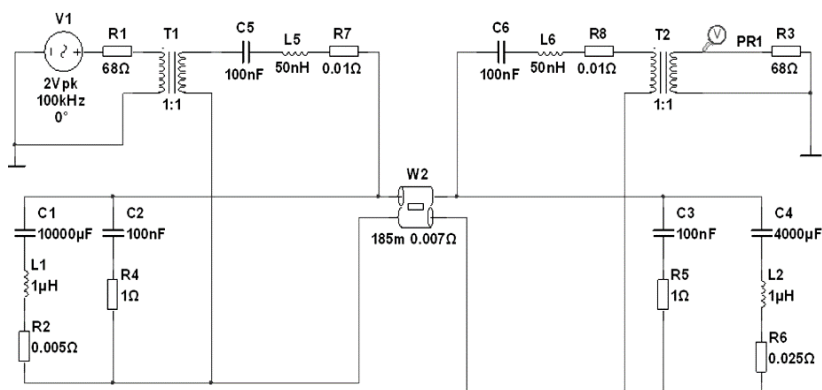


Рис. 1. Модель канала с учетом влияния емкости источника питания и входных цепей питания БПЛА

Как можно увидеть из рис. 2, емкости источника питания и входных цепей питания БПЛА, а также несогласованная длинная линия (кабель питания) оказывают значительное влияние на передаточную характеристику канала связи. Наблюдаются частотно-селективные замирания с периодическим характером, при этом уровень затухания сигнала может достигать 70 дБ. Такие замирания свидетельствуют об отсутствии согласования выходных сопротивлений цепей питания и нагрузки с волновым сопротивлением кабеля питания.

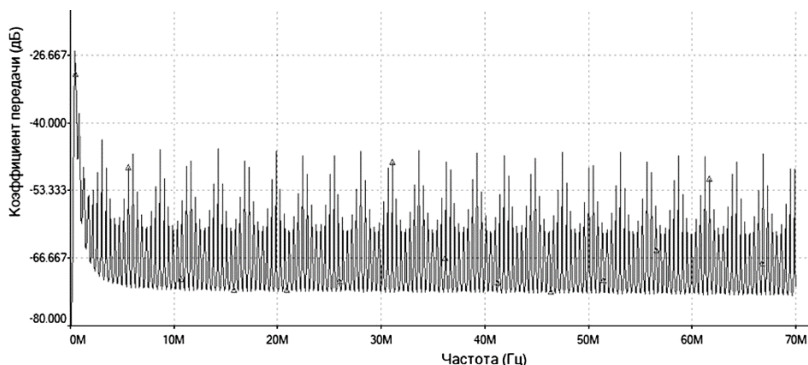


Рис. 2. Передаточная характеристика канала с учетом влияния емкости источника питания и входных цепей питания БПЛА

Проведенное исследование показало, что использование линий электропитания для передачи данных в системах БПЛА является перспективным направлением, однако требует учета влияния емкости источника питания и нагрузки на передачу сигнала. Для минимизации этих эффектов предложено установить индуктивно-емкостный фильтр на выход источника питания и вход цепи питания БПЛА. Это позволит снизить затухание сигнала и улучшить качество связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полтавский А.В. Телекоммуникация систем связи и управления на платформах беспилотных воздушных судов // Научный вестник Моск. гос. техн. ун-та гражданской авиации. – 2021. – Т. 24, № 2. – С. 58–69.
2. Magnusson P.C. et al. Transmission lines and wave propagation. – CRC press, 2017. – 536 p.
3. Кабели, провода, материалы для кабельной индустрии. Технический справочник. – Томск: Научно-производственное предприятие НКП «Эллипс», 2006. – 360 с.
4. Барнс Дж. Электронное конструирование. Методы борьбы с помехами. – М.: Мир, 1990. – 238 с.

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ QNCD В ЗАДАЧЕ ПОВЫШЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ ГРУППИРОВКИ С MU-MIMO

С.Ю. Землянукхин, аспирант каф. ТОР

*Научный руководитель Е.В. Рогожников, доцент каф. ТОР, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, sergzemlyanukhin@yandex.ru*

Рассматривается метод оптимизации прекодирования QNCD на основе квазиньютоновской оптимизации (L-BFGS) для систем с MU-MIMO в сетях низкоорбитальной спутниковой группировки. Проведено моделирование с помощью генератора стохастических каналов QuaDRiGa, подтверждающее преимущество предложенного метода перед методом прекодирования Regularized Zero Forcing (RZF).

Ключевые слова: MU-MIMO, прекодирование, L-BFGS, QNCD, LEO, спектральная эффективность, оптимизация.

Низкоорбитальные спутниковые сети (LEO) с множеством антенн позволяют значительно расширить территориальную область предоставления услуг высокоскоростной передачи данных. Однако для LEO-сетей характерны высокая скорость изменения каналов и сильная пространственная корреляция, что усложняет задачу формирования прекодирующих матриц.

В данной работе функция спектральной эффективности сводится к более вычислительно простой функции, после чего к полученной функции применяется метод оптимизации второго порядка L-BFGS для решения проблемы плохо обусловленных каналов и повышения пропускной способности сети [1].

Отношение уровня сигнала к уровню помех и шума (SINR) для символа l задано следующим образом [2]:

$$\text{SINR}_l(W, H_k, g_l, \sigma, P) = \frac{|g_l H_k w_l|^2}{\sum_{i \neq l} |g_l H_k w_i|^2 + \|g_l\|^2 \frac{\sigma^2}{P}}, \quad (1)$$

где w_l – столбец прекодирующей матрицы, H_k – канальная матрица абонентской станции k , g_l – матрица эквалайзера, σ^2 – дисперсия (мощность) шума и P – суммарная мощность сигналов всех антенн бортовой базовой станции.

Для упрощения функции SINR зададим матрицу эквалайзера, априорно известной в следующем виде:

$$G^C = \tilde{S}^{-1} \tilde{U} \in \mathbb{C}^{L \times R}. \quad (2)$$

Данный вид эквалайзера известен как Conjugate Detection (CD) и состоит из $\tilde{S}^{-1}$ – обратной матрицы сингулярных значений сингулярного разложения канальной матрицы и $\tilde{U}$ – левых сингулярных векторов.

В таком случае функция SINR будет выглядеть как:

$$\text{SINR}_l^C(W, \tilde{v}_l, s_l, \sigma^2, P) = \frac{|\tilde{v}_l w_l|^2}{\sum_{i \neq l} |\tilde{v}_l w_i|^2 + s_l^{-2} \frac{\sigma^2}{P}}. \quad (3)$$

Функция спектральной эффективности примет следующий вид:

$$\text{SE}^C(W, \tilde{V}, \tilde{S}, \sigma, P) = \sum_{l=1}^L \log_2(1 + \text{SINR}_l^C(W, \tilde{v}_l, s_l, \sigma, P)). \quad (4)$$

Задача сводится к минимизации полученной функции

$$\text{SE}^C(W, \tilde{V}, \tilde{S}, \sigma, P) \rightarrow \max_W. \quad (5)$$

Для применения метода оптимизации второго порядка L-BFGS задачу с ограничением на мощность, излучаемую антеннами бортовой базовой станции, необходимо свести к задаче без ограничений. Для этого воспользуемся проекцией

$$w^m = \begin{cases} w^m, & \|w^m\|^2 \leq \frac{P}{T}; \\ \frac{w^m}{\|w^m\|} \sqrt{\frac{P}{T}}, & \|w^m\|^2 > \frac{P}{T}, \end{cases} \quad (6)$$

где $\|w^m\|^2$ – квадрат нормы столбца прекодирующей матрицы, соответствующий мощности сигнала, излучаемой одной антенной, T – количество антенн бортовой базовой станции.

Моделирование сети LEO с помощью генератора стохастических каналов QuaDRiGa производилось с параметрами, представленными в таблице [3].

Параметры модели

Параметры модели	Значение параметра
Сценарий распространения	NTN Urban LOS
<i>LEO спутник</i>	
– Частотный диапазон	Ku
– Антенная решетка	Линейная, 64 элемента
– Вид сигнала	OFDM 256 поднесущих
– Полоса сигнала	100 МГц
<i>Абонентские терминалы</i>	
– Антенная решетка	Линейная, 4 элемента
– Количество терминалов	4

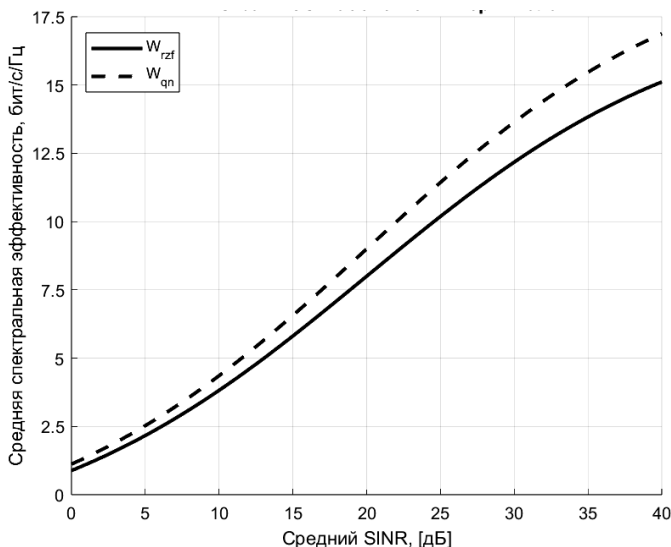


Рис. 1. Функция спектральной эффективности от среднего SINR при использовании прекодера QNCD и RZF

Из рис. 1 видно, что выигрыш алгоритма QNCD по сравнению с алгоритмом RZF для параметров системы, представленных в таблице, достигает 2 бит/с/Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bobrov E. et al. Study on Precoding Optimization Algorithms in Massive MIMO System with Multi-Antenna Users. – 2022. – 16 p.
2. Bakulin M.G. MIMO technology: principles and algorithms / M.G. Bakulin, L.A.Varukina, V.B. Kreindelin // MIMO technology: principles and algorithms. – M.: Hot Line –Telecom, 2022. – 244 p.
3. QuaDRiGa: a MIMO Channel Model for Land Mobile Satellite / F. Burkhardt, S. Jaeckel, E. Eberlein, R. Prieto-Cerdeira // The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014), 2014. – P. 1274– 1278.

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 004.418

ВНЕДРЕНИЕ МОДУЛЯ РАССТАНОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ ДЛЯ САПР СВЧ-УСТРОЙСТВ

*И.А. Данилов, Н.Е. Исайченко, В.Е. Борнашов, студенты;
А.Е. Горяинов, доцент каф. КСУП
г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, llykha1@mail.ru*

Описан процесс интеграции нового модуля расстановки в разрабатываемую САПР «Circuit Studio» компанией «50ohm Technologies». Установлены связи между модулем расстановки и другими модулями основной программы.

Ключевые слова: САПР СВЧ-устройств, внедрение ПО, проектирование ПО, расстановка элементов схемы.

В компании «50ohm Technologies» ведется рефакторинг модуля автоматической расстановки и отрисовки принципиальных схем в САПР «Circuit Studio» [1]. В основу программы заложен генетический алгоритм, который синтезирует различные варианты схем и, оценивая их по заданным требованиям, выбирает наилучшие из них. Таким образом, на вход программы подается набор требований к устройству, а на выходе получаются готовые решения в виде логического представления схемы [2].

После получения логического представления необходимо преобразовать его в описание принципиальной схемы устройства для дальнейшей отрисовки. Существующий модуль расстановки и отрисовки имеет недостатки, связанные с высокой связностью и низкой масштабируемостью.

Рефакторинг модуля заключается в разделении модуля отрисовки и расстановки на 2 отдельных модуля, что позволит устранить данные недостатки.

После проведения рефакторинга необходимо внедрить решения в основную программу. Таким образом, **целью данной работы** является внедрение разработанного модуля расстановки в САПР «Circuit Studio».

На рис. 1 представлена UML-диаграмма пакетов, которая показывает внедрение модулей в САПР «Circuit Studio» [3].

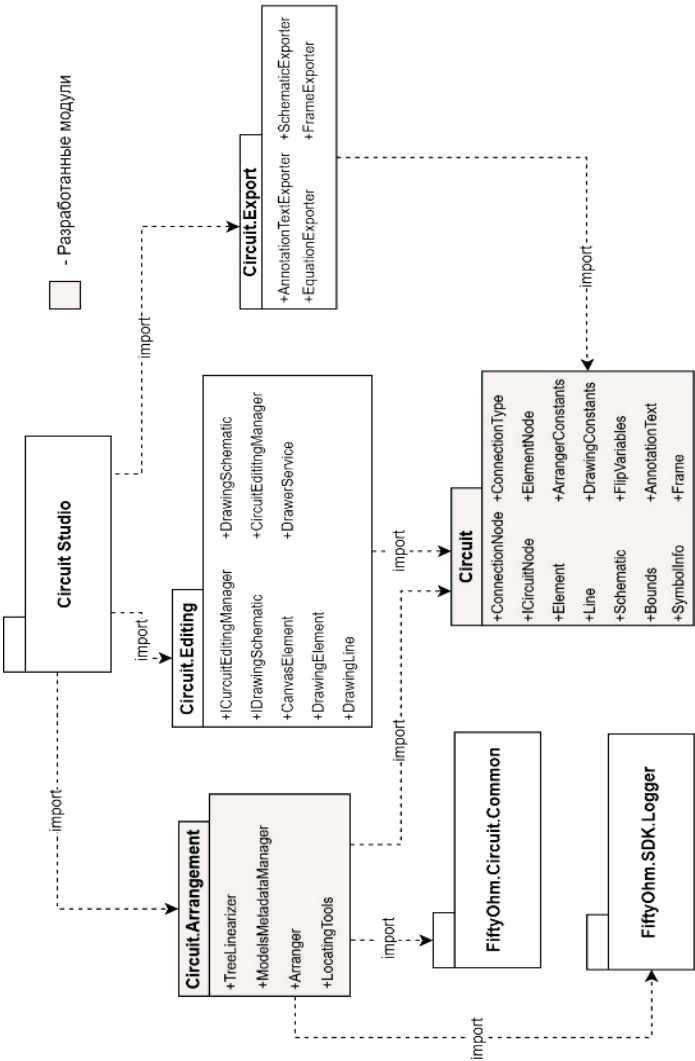


Рис. 1. UML-диаграмма пакетов, описывающая внедрение модулей

1. Circuit – пакет, хранящий классы для логического и пространственного представления схемы.

2. FiftyOhm.Circuit.Common – пакет, который содержит метаданные элементов PDK.

3. FiftyOhm.SDK.Logger – сборка для логирования сведений о работе модуля расстановки.

4. Circuit Studio – сборка, которая будет использовать модуль автоматической расстановки элементов принципиальных схем.

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 [4].

Для сохранения общих сведений о работе модуля расстановки, необходимых 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. 50ohm Technologies LNA Designer [Электронный ресурс]. – URL: <https://50ohm.tech/ru/lnadesigner> (дата обращения: 20.02.2025).

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. Руководство по созданию UML-схем и моделированию баз данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/business-insights-ideas/resources/guide-to-uml-diagramming-and-database-modeling>, свободный (дата обращения: 14.11.2024).

4. 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.

**МОДИФИКАЦИЯ СПОСОБА ЗАДАНИЯ
СТРУКТУРНЫХ ТРЕБОВАНИЙ
В ПРОГРАММЕ ПОИСКА ПОРЯДКА ВКЛЮЧЕНИЯ СЕКЦИЙ
МНОГОРАЗЯДНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ**

А.А. Зувевич, К.Н. Полухвайко, Т.Р. Рафиков,

В.Е. Борнашов, 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*

В ходе использования программы Combinatorics в решении задач по проектированию многоразрядных СВЧ-устройств, таких как ступенчатые аттенюаторы и фазовращатели, определен ряд замечаний, связанных с пользовательским опытом. В работе описывается разработка новой версии программы, направленная на исправление замечаний. В частности, модифицирована вёрстка вкладки «Секции» для задания структурных ограничений во время перестановок секций внутри устройства.

Ключевые слова: ступенчатые аттенюаторы, ступенчатые фазовращатели, многоразрядные СВЧ-устройства, автоматизированное проектирование СВЧ-устройств, разработка ПО.

В работе [1] представлена программа 50ohm Tech Combinatorics, автоматизирующая определение порядка включения секций многоразрядных СВЧ-устройств, таких как ступенчатые аттенюаторы (СА) и фазовращатели (СФ). Программа выполняет все возможные перестановки секций внутри устройства и рассчитывает комплекс целевых частотных характеристик. Таким образом, пользователь может выбрать оптимальный (на его взгляд) порядок включения секций и перейти к разработке топологии конечного устройства. Это значительно сокращает время разработки всего устройства и позволяет получить устройство с более качественными характеристиками.

В ходе применения программы в решении реальных задач проектирования определены недостатки пользовательского интерфейса. Так, в частности, в программе существует вкладка «Секции», позволяющая определить варианты схем, используемых в качестве секции заданного уровня ослабления или фазового сдвига. Варианты схем задаются с помощью загрузки параметров рассеяния секции, представленных в формате Touchstone [2]. В дальнейшем программа будет использовать загруженные файлы отдельных секций для моделирования частотных характеристик всего устройства.

Введите название и параметры для секции

Секция

Название:

Секция (0,5 дБ)

Ослабление, дБ:

0,5

Варианты схем (состояние REF)

1 Solution_Op5dB_1_State01.s2p

2 Solution_Op5dB_2_State01.s2p

3 Solution_Op5dB_3_State01.s2p

+

×

Варианты схем (состояние ATT)

1 Solution_Op5dB_1_State02.s2p

2 Solution_Op5dB_2_State02.s2p

3 Solution_Op5dB_3_State02.s2p

+

×

?

Добавьте sNr файлы варианта схемы для каждого состояния секции.
Файлы одного и того же варианта должны быть под одним и тем же индексом в обоих списках.
Используйте Drag&Drop для быстрого добавления и редактирования списков.

OK

Отмена

Модифицированный способ задания структурных требований включает в себя изменение вёрстки вкладки «Секции» главного окна следующим образом (рис. 2): в отличие от текущей версии модифицированный интерфейс позволяет загрузить файлы с помощью Drag&Drop непосредственно на вкладке «Секции» без открытия дополнительного окна.

После загрузки файлов автоматически появится всплывающее окно (рис. 3), где пользователь сможет при необходимости переместить файлы между списками состояний.

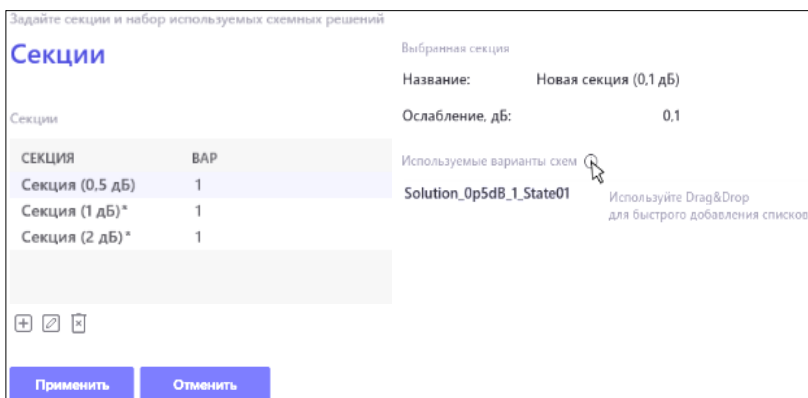


Рис. 2. Вид модернизированной вкладки «Секции» со списком для добавления файлов, описывающих состояния схемы

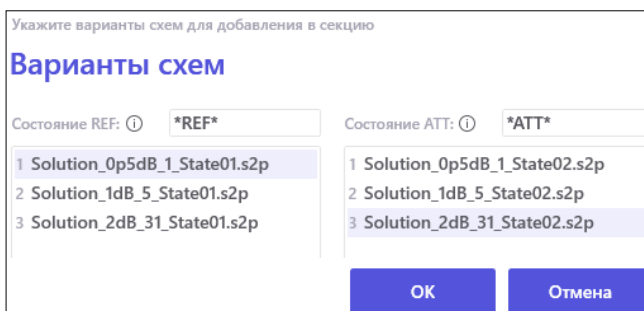


Рис. 3. Всплывающее окно для редактирования файлов, описывающих состояния схемы

Также появилась возможность задания маски имени файла для автоматического определения состояния секции, к которому относится файл. Таким образом, пользователю не нужно по отдельности заполнять два списка файлов, а достаточно перенести файлы состояний, а программа автоматически распределит их по состояниям. После закрытия всплывающего окна пользователю необходимо будет сохранить или отменить внесённые изменения с помощью кнопки «Применить» или «Отменить» соответственно. Секции с несохранёнными изменениями помечаются символом «*» (см. рис. 2).

Таким образом, в результате модификации приложение 50ohm Tech Combinatorics предоставляет улучшенный пользовательский опыт и расширенные возможности задания структурных требований.

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 г.
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: 04.03.2025).

УДК 004.414.38

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ «ДИАГРАММА СМИТА–ВОЛЬПЕРТА» ДЛЯ САПР СВЧ-УСТРОЙСТВ

Р.С. Титова, А.В. Мирошников, Д.В. Дей, В.Д. Москвин

*Научный руководитель М.В. Черкашин, доцент каф. КСУП, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, tamoshka2@gmail.com*

Представлены функциональные требования и проект структуры программного модуля для отображения диаграммы Смита–Вольперта.

Ключевые слова: СВЧ, САПР, диаграмма Смита–Вольперта, QT, C++.

В настоящее время в РФ активно реализуется программа развития отечественной микроэлектроники [1]. Данная программа включает в себя в том числе и разработку отечественных САПР различного уровня для автоматизации проектирования цифровых и аналоговых интегральных схем (ИС). Одним из важных частей в составе САПР аналоговых СВЧ-цепей и устройств является программный модуль, реализующий отображение диаграммы Смита–Вольперта, на основе которой реализуется как визуализация данных, так и графоаналитический расчет согласующих цепей. Несмотря на то, что существует достаточно большое число решений, большинство из них либо уже входят в состав зарубежных САПР и систем моделирования (например, [2]), либо являются отдельными программами (например, [3]), использование которых в составе собственной программной системы затруднено.

Таким образом, задача разработки собственного программного модуля для отображения диаграммы Смита–Вольперта и реализация на его основе инструмента для визуализации данных и расчета согласующих цепей является актуальной проблемой.

Поскольку система должна иметь возможность запуска и работы на разных платформах, наиболее подходящим средством для отображения графики является QT, а языком программирования C++. QT –

кроссплатформенный фреймворк для создания графических приложений для десктопа, мобильных и встроенных устройств. Он предоставляет разработчикам отличный набор инструментов для проектирования и создания приложений, вне зависимости от платформы [4].

В процессе обзора существующих программных решений нами были выделены следующие функциональные требования к разрабатываемому модулю:

1. Отрисовка диаграммы полных сопротивлений и проводимостей с возможностью ее масштабирования и настройки визуального оформления (тип, цвет линий, маркеры и др.).
2. Отображение характеристик активных СВЧ-цепей, заданных в виде s-параметров (формат S2P).
3. Визуальный расчёт согласующих цепей (СЦ) на сосредоточенных и распределенных элементах.
4. Отображение принципиальной схемы СЦ и её изменений в результате взаимодействия с диаграммой.
5. Расчет и отображение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) полученной СЦ.
6. Загрузка/сохранение результатов расчетов в файл, а также экспорт/импорт в стандартный файл (netlist) формата Spice.

Каждую из описанных функциональностей было решено представить в виде отдельных модулей, что отображено на диаграмме пакетов (рис. 1).

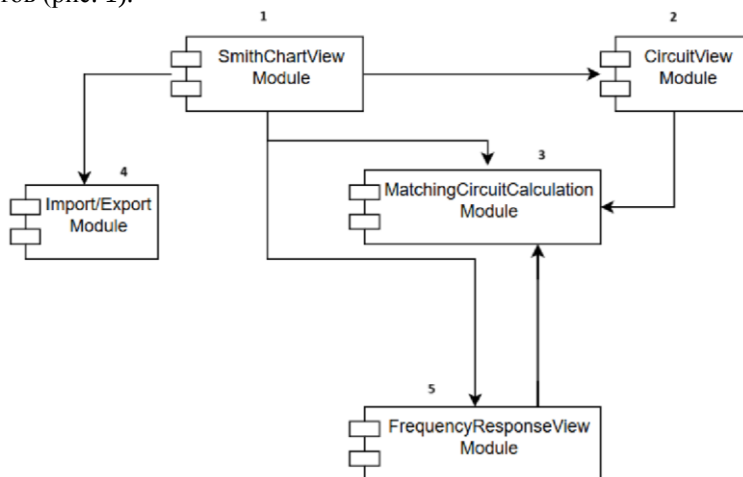


Рис. 1. Диаграмма пакетов программного модуля:

1 – отображение приложения и диаграмм; 2 – отображение принципиальной схемы; 3 – расчёт согласующей цепи; 4 – загрузка/сохранение результатов расчетов; 5 – расчет и отображение АЧХ

Такое представление является результатом декомпозиции, что в дальнейшем позволит [5]:

- 1) осуществить возможность асинхронной разработки;
- 2) сократить время на поиск ошибок и тестирование каждого из модулей;
- 3) улучшать и изменять отдельные модули программы без возможности критического сбоя работы всей системы;
- 4) соблюдать принцип единой ответственности, при котором каждый класс/модуль отвечает лишь за одну функциональность;
- 5) улучшить читаемость кода, ослабить связность отдельных его частей.

В качестве прототипа графического интерфейса пользователя нами был взят интерфейс программы Smith Chart [3] (рис. 2).

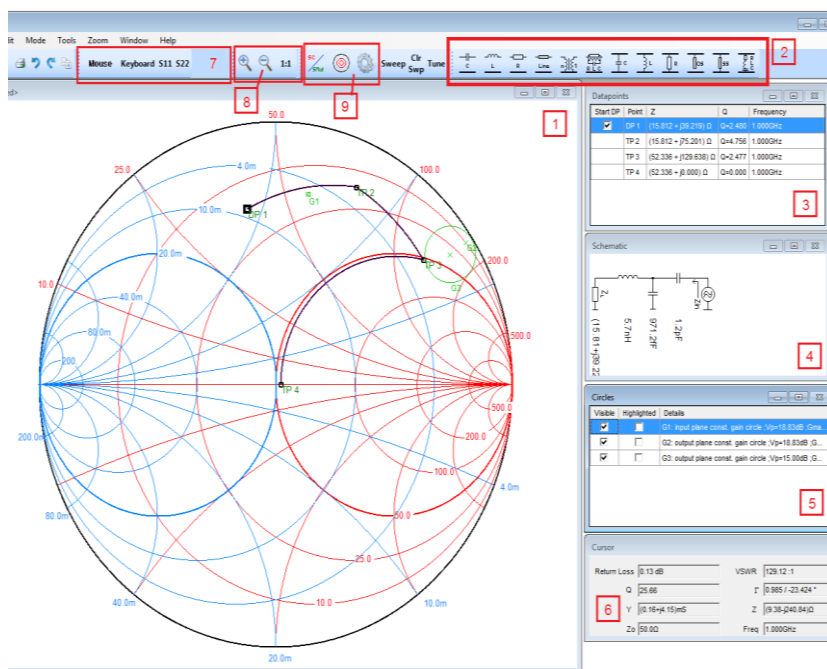


Рис. 2. Интерфейс пользователя программы Smith Chart:

- 1 – окно отображения диаграммы Смита; 2 – панель элементов СЦ;
- 3 – окно для вывода рабочих точек; 4 – окно отображения схемы СЦ; 5 – окно отображения параметров окружностей; 6 – окно вывода значений курсора;
- 7 – панель выбора режима ввода данных; 8 – панель для масштабирования диаграммы; 9 – панель для выбора режима работы и настроек программы

Интерфейс данной программы вполне соответствует заданным функциональным требованиям, с учетом добавления графического окна для отображения АЧХ ЦЦ.

Таким образом, в ходе анализа предметной области нами были выбраны среда реализации, определены функциональные требования к программному модулю и разработана его структура.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года: сайт «Консорциум Кодекс» [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/564162587> (дата обращения: 25.02.2025).

2. САПР Keysight ADS: офиц. сайт [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-05300/technical-overviews/5992-1635.pdf> (дата обращения: 25.02.2025).

3. Smith Chart v4.1: офиц. сайт [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.fritz.dellsperger.net/smith.html> (дата обращения: 25.02.2025).

4. QT и C++ [Электронный ресурс]. – URL: <https://metanit.com/cpp/qt/1.2.php> (дата обращения: 25.01.2025).

5. Гради Б. и др. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений / М.У. Энгл, Б.Дж. Янг, Д. Коналлен, К.А. Хьюстон / пер. с англ. – М.: ИД Вильямс, 2010. – 720 с.

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 53.537.9

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТОВ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

А.С. Чехранова, студентка каф. радиоэлектроники

*Научный руководитель О.А. Доценко, доцент каф. радиоэлектроники
НИ ТГУ*

г. Томск, НИ ТГУ, anastasia17cheh@gmail.com

Представлены результаты исследования частотной зависимости диэлектрической проницаемости композиционных материалов на основе многослойных углеродных нанотрубок и акриловой краски. Проведено сравнение комплексной диэлектрической проницаемости экспериментальных образцов, изготовленных при длительности ультразвуковой обработки от 0 до 40 мин. Показано, что длительность ультразвуковой обработки исходной суспензии оказывает немонокотное влияние на электрофизические характеристики изготовленных образцов.

Ключевые слова: многослойные углеродные нанотрубки, композит, ультразвуковая обработка, диэлектрическая проницаемость.

Разработка композиционных материалов является одним из способов получения продуктов с уникальными свойствами, в которых концентрация наполнителя и технологические приемы играют решающую роль. Одним из этапов при создании композиционных полимерных материалов является добавление твердых включений в жидкое связующее и их диспергирование при помощи ультразвукового воздействия. Этот процесс может привести к получению эмульсий, свойства которых будут отличаться от свойств исходных компонентов, а также зависеть от длительности воздействия ультразвуком.

Применение углеродных проводящих наноструктур в качестве наполнителя [1] влияет на величину диэлектрической проницаемости изготовленных образцов композитов [2], что в конечном итоге определяет возможные области их использования: отражающие или поглощающие покрытия, составные части радиоэлементов и др.

Целью работы является изучение электрофизических механизмов, возникающих в композитах на основе многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) и акриловой краски, и влияние на них длительности ультразвуковой обработки исходной эмульсии.

В качестве наполнителей использованы многослойные углеродные нанотрубки со средним диаметром 9,4 нм и длиной 15 мкм. Связующим являлась акриловая краска (база С) производства ООО «НПП Рогнеда», МО, г. Ст. Купавна. Состав краски производителями полностью не раскрывается. Были изготовлены экспериментальные образцы композиционных материалов с концентрацией наполнителя 0,5 мас.% по методике, описанной в работе [3]. Параметры ультразвуковой обработки (УЗО): погружной зонд с мощностью 75 Вт и частотой ультразвуковых колебаний 24 кГц. Измерения диэлектрической проницаемости проводились с помощью конденсаторного метода [3].

На рис. 1 приведены частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) изготовленных образцов. Незакрашенные черные кружки соответствуют исходной краске. Соответствие остальных цветов минутам УЗО приведены на легенде.

Из рис. 1 видно, что для исходной краски $\epsilon'' > \epsilon'$ на частотах до 400 Гц. Это указывает на наличие в краске проводимости на постоянном токе. Добавление МУНТ увеличивает значения КДП, что указывает на аддитивный вклад наполнителя в диэлектрическую проницаемость композита. Действительная часть диэлектрической проницаемости ϵ' всех исследуемых образцов претерпевает существенную дисперсию (см. рис. 1, а). По мере увеличения частоты значение ϵ' уменьшается в зависимости от времени УЗО примерно на 2–4 порядка. Наблюдаемое монотонное уменьшение диэлектрической проницаемости образцов свидетельствует о наличии в исследуемых образцах механизма релаксационной дисперсии.

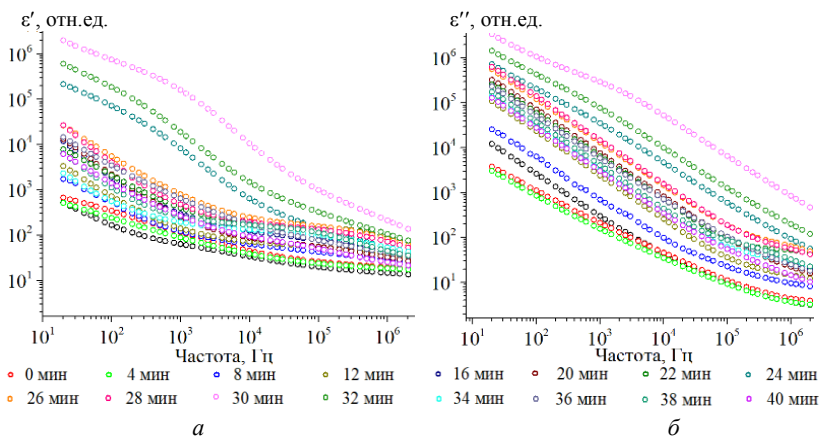


Рис. 1. Частотные зависимости действительной (а) и мнимой (б) частей диэлектрической проницаемости

Также наблюдается немонотонная зависимость ϵ' от времени УЗО. Имеются локальные минимумы при временах УЗО 12, 24 и 40 мин. Такое поведение ϵ' указывает на перестройку внутренней структуры в образцах. Наибольшее значение ϵ' соответствует УЗО, равной 30 мин. Значения мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ'' варьируют в пределах 10^6 – 10 . На частотах до 5 кГц у образцов, содержащих МУНТ, при начальных временах обработки (0 и 4 мин) мнимая часть диэлектрической проницаемости ϵ'' исходной краски выше, чем композитов (см. рис. 1, б). Возможно, добавление МУНТ приводит к уменьшению проводимости на постоянном токе за счет связывания агломератами МУНТ проводящих наполнителей, присутствующих в исходной краске.

При последующих временах УЗО потери в образцах увеличиваются и так же, как для ϵ' , наблюдается их немонотонная зависимость от длительности воздействия. Наибольшее значение ϵ'' соответствует УЗО, равной 30 мин.

Появление временных экстремумов при исследовании частотных зависимостей КДП можно объяснить перестройкой внутренней структуры, связанной: 1) с распутыванием агломератов и появлением в объеме длинных одиночных нанотрубок, образующих проводящую цепь (первый максимум); 2) укорочением дефектных нанотрубок и появлением повторных контактов (второй максимум); 3) утончением нанотрубок, приводящим к повышению аспектного отношения МУНТ, что влечет рост проводимости наполнителя и увеличение вероятности появления контактов между проводящими включениями.

В результате проведенного исследования был дан анализ частотных зависимостей КДП композиционных материалов с включениями МУНТ. Показано, что длительность ультразвуковой обработки композитов приводит к немонотонному изменению значений КДП, связанной с перестройкой внутренней структуры композита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование электрической проводимости в спиртовых суспензиях многослойных углеродных нанотрубок / Ю.В. Панин, Ю.П. Прилепо, Ж.Н. Торба, А.Г. Чуйко // Вестник ВГТУ. – 2012. – № 2. – С. 70–72.
2. Dispersing of functionalized CNTs in Si-O-C ceramics and electromagnetic wave absorbing and mechanical properties of CNTs/Si-O-C nanocomposites / D. Ding, J. Wang, X. Yu, et. al. // Ceramics International. – 2020. – Vol. 46. – P. 5407–5419. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.10.297.
3. Влияние ультразвуковой обработки на диэлектрическую проницаемость композитов с углеродными нанотрубками / А.С. Червинская, О.А. Доценко, Е.С. Беломыцева, А.О. Качусова // Известия вузов. Физика. – 2023. – Т. 66, № 5. – С. 96–102.

УДК 53.087.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ ПО СТАТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

Е.В. Парахина, А.А. Швадленко, студенты каф. КУДР

Научный руководитель С.Г. Еханин, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н.

Проект ГПО КУДР-2002. Изучение деградации светодиодных

гетероструктур методом измерения ВАХ

и свечения в области микротоков

г. Томск, ТУСУР, alisashvadlenko@gmail.com

Для неразрушающей диагностики кристалла светоизлучающего диода использован метод, основанный на статической АВ-модели. При этом измерялась ватт-амперная характеристика СИД на участке нарастания внутренней квантовой эффективности (ВКЭ). Проводилась аппроксимация экспериментальной зависимости, по которой определялись величины коэффициентов аппроксимации и зависимость ВКЭ от тока.

Ключевые слова: светоизлучающий диод, ватт-амперная характеристика, внутренняя квантовая эффективность.

В настоящее время все актуальней становится задача импортозамещения, поэтому в АО НИИПП г. Томска стоит задача производства своих кристаллов светоизлучающих диодов (СИД) с параметрами, не

уступающими зарубежным. Поэтому возник вопрос о количественном определении эффективности выпускаемых СИД.

Известно, что общая эффективность светодиодного устройства характеризуется энергетической эффективностью (РЕ), определяемой отношением мощности излучения (оптической мощности) светодиода к потребляемой электрической мощности [1]. Параметр РЕ показывает, насколько эффективно устройство преобразует электрическую мощность в желаемую мощность излучения. Но не позволяет судить о качестве слоев, концентрации примеси, плотности собственных точечных дефектов и т.д.

В данной работе приводятся результаты определения внутренней квантовой эффективности (ВКЭ) гетероструктуры СИД с помощью теоретического метода определения постоянных коэффициентов АВ – коэффициентов излучательных и безызлучательных процессов в полупроводниковой гетероструктуре.

Вывод расчетных формул. В АВ-модели [2] учитываются эффективная безызлучательная рекомбинация с постоянным коэффициентом рекомбинации А и радиационная рекомбинация с другим постоянным коэффициентом В в предположении, что эффективность инжекции равна 100% при малых токах.

$$I \approx \frac{eV}{\gamma_{inj}} (An + Bn^2), \quad (1)$$

где V – объем активной области, γ_{inj} – эффективность инжекции, e – элементарный заряд. Из уравнения (1) получаем выражение для концентрации носителей:

$$n = \frac{A}{2B} (\sqrt{1 + 2qI} - 1), \quad (2)$$

где введено обозначение

$$q = \frac{\gamma_{inj}}{eV} \frac{2B}{A^2}. \quad (3)$$

Подставляя выражение для концентрации носителей в формулу для определения мощности излучения, получаем:

$$P = \eta_{extr} V \frac{hc}{\lambda} Bn^2 = m(1 - \sqrt{1 + 2qI} + qI), \quad (4)$$

где η_{extr} – коэффициент вывода излучения из активной области, m – некий масштабный коэффициент. Тогда величина ВКЭ будет равна [2]

$$\eta(I) = \frac{\sqrt{1 + 2qI} - 1}{\sqrt{1 + 2qI} + 1}. \quad (5)$$

Методика исследования и описание экспериментальной установки. Принцип работы измерительной установки заключается в измерении освещенности, создаваемой за счет электролюминесценции СИД, через который протекает ток определенной величины, подаваемый от источника-измерителя ВАХ (параметрический анализатор Keysight B2912A). Оптический сигнал светодиода подается на вход люксметра, который осуществляет измерение светового потока и создаваемую освещенность в люксах. Программная часть комплекса разработана в среде графического программирования LabVIEW. В программе реализован процесс инициализации всех подключенных к компьютеру приборов. Имеется возможность ручного управления параметрами приборов (источника-измерителя и люксметра).

Результаты исследования и обсуждение. Был исследован образец фирмы SemiLED. Измеряя значения P полной мощности излучения при заданных значениях прямого тока I , получим экспериментальную относительную ватт-амперную характеристику $P/P_0 = f(I)$ светодиода. Задача состоит в том, чтобы аппроксимировать данную зависимость согласно формуле (4). Для проведения аппроксимации необходимо подобрать значение коэффициентов q и m . Величина q описывается формулой (3) и характеризует крутизну получаемой аппроксимации. Коэффициент m определяет масштабирование (соответствие максимальной и минимальной точки экспериментальной кривой). Данные величины подбираются исходя из метода наименьших квадратов. В данной работе $m = 0,11$; $q = 0,2$ и определялись с помощью Microsoft Excel.

Зная величину q , по формуле (5) можно определить зависимость внутреннего квантового выхода (ВКЭ) от величины тока.

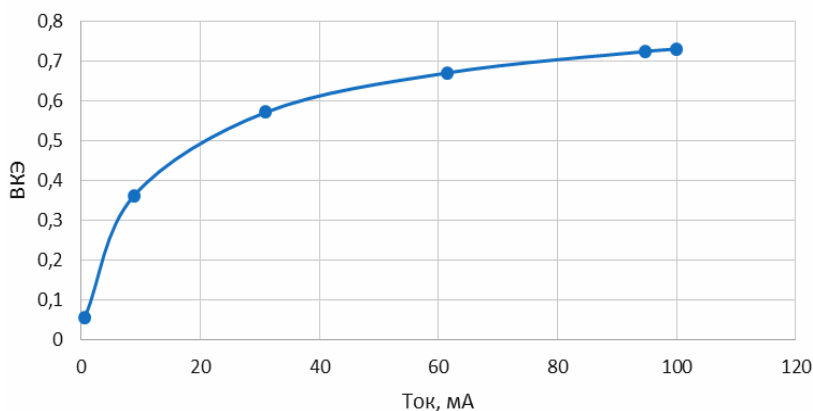


Рис. 1. Нормированная зависимость ВКЭ от величины тока

Как видно из рисунка с увеличением тока ВКЭ плавно увеличивается и достигает в максимуме величину, превышающую 0,7, что находится в хорошем совпадении с литературными данными для данного типа покупного светодиода.

Заключение. Данный метод позволяет определять квантовую эффективность, используя статическую АВС-модель. Показано, что ВКЭ возрастает с увеличением тока и достигает максимума эффективности при 100 мА, что составляет 30 процентов от допустимого рабочего тока. Величина максимального значения ВКЭ достигает 0,7, что хорошо согласуется с литературными данными. Данный метод можно применять при диагностике или при входном контроле производимых в НИИПП светодиодных гетероструктур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шуберт Ф. Светодиоды / Под ред. А.Э. Юновича. – М.: Физматлит, 2008.
2. 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.

УДК 53.043

МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

Н.Ф. Яровая, Е.В. Парахина, студентки

*Научный руководитель С.Г. Еханин, проф. каф КУДР, д.ф-м. н.
г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, natalaarovaa78@gmail.com*

Проведено измерение спектров различных светодиодных источников освещения: осветительные приборы, мониторы компьютеров, экраны телевизоров и др. Показано, что спектры таких устройств не сплошные с преобладанием излучения синего цвета, что, как известно, может приводить к негативным последствиям. Указаны причины такого явления и предложены пути решения.

Ключевые слова: полупроводниковые светодиоды, спектральные характеристики, медико-биологические проблемы.

Светодиодное освещение имеет ряд преимуществ в сравнении с лампами накаливания и люминесцентными лампами: срок службы светодиодных ламп во много раз дольше; они не нагреваются и не нуждаются в отдельных полигонах для утилизации, а также потребляют меньше электричества [1].

Светодиодное освещение распространилось на все сферы жизни человека: светодиодные лампы установлены в офисах, уличном освещении и в жилых помещениях. Также светодиоды используются в экранах смартфонов и компьютерных мониторах. В современных условиях человек большую часть дня находится под влиянием светодиодного освещения. И, как оказалось, такое освещение негативно сказывается на его состоянии и качестве жизни [2].

В данной работе рассматриваются причины и возможные решения проблемы негативного влияния светодиодного освещения на физическое состояние человека.

Описание экспериментальной установки. Методика исследования. Экспериментальная установка включает в себя оптоволоконный спектрометр Optosky АТР3030. В качестве исследуемых источников освещения используются белый светодиод, потолочные лампы в аудитории, белый экран монитора, лампа Phillips/IKEA и естественный солнечный свет. Оптоволоконный спектрометр имеет высокую чувствительность, равную $1300 \text{ В/лк}\cdot\text{с}$, диапазон измерений $200\text{--}1000 \text{ нм}$ и оптическое разрешение $0,1\text{--}0,4 \text{ нм}$.

Чтобы получить достоверные результаты, необходимо обеспечить примерно одинаковые условия проведения экспериментов.

Экспериментальные результаты и обсуждение. На рис. 1 представлен спектр фотолюминесценции белого светодиода.

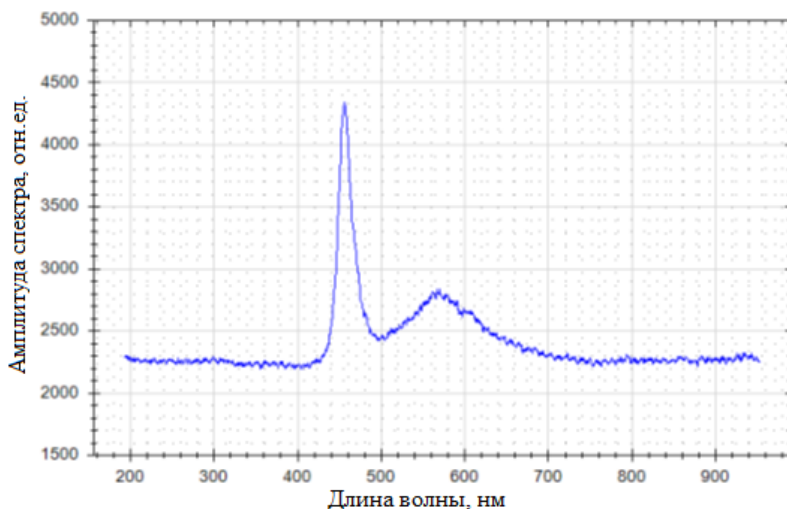


Рис. 1. Спектр белого светодиода

Как видно из рис. 1, несмотря на то, что светодиод излучает белый свет, спектр его показывает, что синий цвет преобладает над остальными цветами и превышает их как минимум в 3 раза. Как известно, над синим светодиодом располагается люминофор, с помощью которого синее излучение светодиода превращается в белое. При недостаточной компенсации и возникает избыток синего света.

Из литературных источников известно, что излучение синего света вызывает болезнь глаз под названием дегенерация макулы [2]. Она возникает при дегенерации сетчатки, в результате чего можно полностью потерять зрение.

Основной целью искусственного освещения является как можно точнее повторить естественное освещение, чтобы минимизировать нагрузку на глаза и избежать негативного влияния на здоровье.

Спектр осветительных ламп практически не отличается от спектра светодиода, что не удивительно, поскольку лампа состоит из множества отдельных светодиодов.

Что касается спектра излучения монитора компьютера и экрана телевизора, то известно, что белый цвет в этих устройствах «строится» с помощью RGB-метода, т.е. смешением 3 основных цветов. Очевидно, что и в том и другом случае наблюдается преобладание синего цвета над остальными.

Основными отрицательными отличиями искусственного светодиодного освещения экранов, телефонов и телевизоров от естественного являются преобладание синего света и нарушение непрерывности спектра и это является основными факторами, ухудшающими зрение человека.

Заключение. Поскольку во многих общественных светодиодных осветительных устройствах имеется вышеуказанный недостаток, можно рекомендовать при работе с таким освещением использование светозащитных очков с необходимым спектральным поглощением избытка синего света. Этой рекомендации следует придерживаться и при длительной работе с монитором компьютера или при длительном просмотре телевизионных программ. Как показали испытания, большинство солнцезащитных очков поглощают не только ультрафиолетовое излучение, но и избыток фиолетового и синего света.

В дальнейшем разработчикам светодиодных осветительных приборов следует обращать внимание на данную проблему и уделить внимание разработке новых люминофоров, которые создают непрерывный спектр и компенсируют избыток синего света.

Некоторые зарубежные фирмы утверждают, что светодиодные лампы низкого качества вызывают головокружение и усталость глаз.

Также они утверждают, что более дорогостоящие лампы их производства лишены данных недостатков. Исследование таких ламп показало, что действительно, пик синего цвета в таких лампах уменьшился, но не исчез полностью. Кроме того, обнаружена повышенная пульсация света у таких ламп. Таким образом, необходимо продолжить исследования в данной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов А.В. Эффективность светодиодного освещения / А.В. Абрамов, Н.Г. Дерягин, Ю.М. Мелихов // Организационно-экономические аспекты сервиса. – 2012. – № 4 (22) – С. 66–72.

2. Как светодиодные лампы влияют на здоровье и зрение? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lighting.philips.ru/consumer/led-lights/eyecomfort/light-and-health> (дата обращения: 05.03.2025).

УДК 53.087.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕЙ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

А.А. Швадленко, Е.А. Тюриков, студенты каф. КУДР

*Научный руководитель С.Г. Еханин, проф. каф. КУДР, д.ф.-м.н.
г. Томск, ТУСУР, alisashvadlenko@gmail.com*

Разработана методика определения внешней квантовой эффективности для синих светодиодов. Проведены измерения и расчеты внешней квантовой эффективности по алгоритмам разработанной методики. Полученные результаты согласуются в литературными данными. Разработанная методика измерения внешней квантовой эффективности может использоваться для более точного определения внутренней квантовой эффективности и может быть применена на производстве.

Ключевые слова: светоизлучающий диод, ватт-амперная характеристика, внешняя квантовая эффективность.

В настоящее время все актуальней становится задача производства отечественных кристаллов светоизлучающих диодов (СИД) с параметрами, не уступающими зарубежным. Поэтому возник вопрос о количественном определении эффективности выпускаемых СИД.

Обычно уделяется внимание определению внутренней квантовой эффективности [1], т.к. ее величина напрямую характеризует качество светодиодной гетероструктуры (соотношение излучательной и безызлучательной рекомбинации носителей). Однако в реальности, чтобы решить эти задачи, сталкиваются с другими проблемами: как измерить количество излученных из СИД квантов и сколько этих квантов

задержалось в элементах конструкции при выходе из активной области наружу.

Приведены результаты определения внешней квантовой эффективности (ВКЭ) кристаллов СИД с помощью типового оборудования [2].

Описание экспериментальной установки и методики исследования. Принцип работы измерительной установки заключается в измерении освещенности, создаваемой за счет электролюминесценции СИД, через который протекает ток определенной величины, подаваемый от источника-измерителя ВАХ (параметрический анализатор Keysight B2912A). Световой поток измерялся с помощью люксметра RADEX Lupin, расположенного вплотную к излучающей поверхности светодиода.

Результаты исследования и обсуждение. Полученную в эксперименте величину освещенности, создаваемой светодиодом при токе 100 мА, так же, как и в статье [2], переведем в ватт/м².

$$E_{100} = \frac{2,53 \cdot 10^5}{6,83 \cdot 10^2} = 0,37 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]. \quad (1)$$

Зная площадь кристалла, подсчитаем энергию, излучаемую СИД:

$$E_{\text{СИД}} = E_{100} \cdot S_{\text{СИД}} = 0,37 \cdot 10^3 \cdot 10^6 = 0,37 \cdot 10^{-3} [\text{Вт}]. \quad (2)$$

Чтобы подсчитать количество фотонов, излучаемых синим СИД, нужно определить их энергию в Дж:

$$h\nu_{\text{эВ}} = 2,7 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 4,32 \cdot 10^{-19} [\text{Дж}]. \quad (3)$$

Таким образом, количество фотонов, излученных из СИД за секунду:

$$N_{\text{фСИД}} = \frac{E_{\text{СИД}}}{h\nu_{\text{СИД}}} = \frac{0,37 \cdot 10^{-3}}{4,32 \cdot 10^{-19}} = 8,56 \cdot 10^{14}. \quad (4)$$

Количество электронов, прошедших через *p-n*-переход за секунду при токе 100 мА:

$$N_{\text{эл}} = \frac{0,1}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,25 \cdot 10^{17}. \quad (5)$$

Тогда внешняя квантовая эффективность будет равна

$$\eta = \frac{N_{\text{фСИД}}}{N_{\text{эл}}} = \frac{8,56 \cdot 10^{14}}{6,25 \cdot 10^{17}} = 1,36 \cdot 10^{-3} = 0,00136. \quad (6)$$

Как видно из расчетов, величина квантового выхода чрезвычайно мала. Проведенный анализ причин получения столь малой величины η показал, что чувствительность люксметра к синему цвету во много

раз меньше, чем к зеленому, на который настроены все измерители световых потоков. Определить поправочный коэффициент чувствительности (К) люксметра к излучению синего СИД можно графическим методом.

На рис. 1 представлены спектр изменения чувствительности люксметра от длины волны $F_{ст}(\lambda)$ – 1; излучения синего СИД $F_{сид}(\lambda)$ – 2; зависимость произведения функций $F_{сид}(\lambda)$ и $F_{ст}(\lambda)$ – 3.

Для того чтобы определить поправочный коэффициент (К), надо взять отношение площади под кривой (2) – $F_{ст}(\lambda)$ к площади под кривой (3), которая является произведением функций $F_{сид}(\lambda)$ и $F_{ст}(\lambda)$. Как оказалось, поправочный коэффициент равен 80. Если учесть поправочный коэффициент, то показания люксметра необходимо увеличить примерно в 80 раз, а значит, и количество излучаемых фотонов увеличится во столько же.

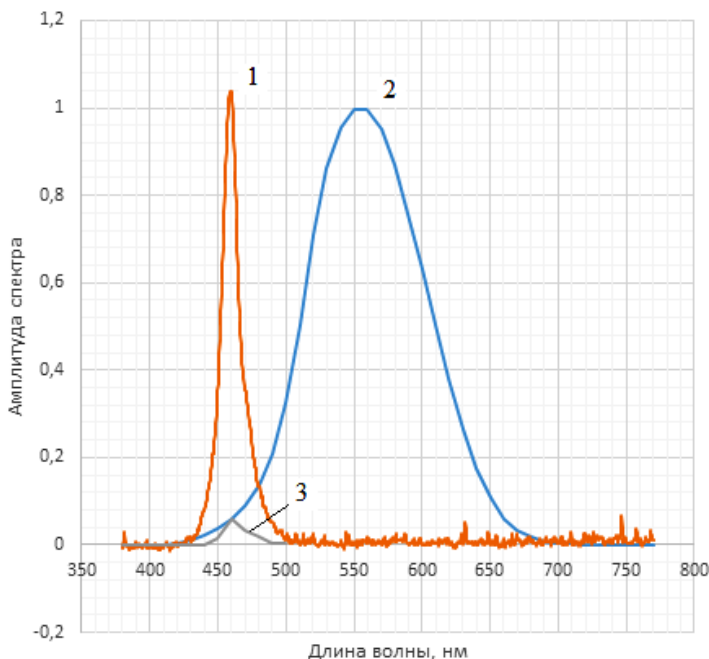


Рис. 1. Спектр излучения СИД «SemiLEDs» (1) и спектральная чувствительность люксметра (2)

Кроме того, как оказалось, площадь чувствительного элемента люксметра меньше площади кристалла СИД примерно в 4 раза, поэтому при определении освещенности показания люксметра надо

умножать не на площадь СИД, а на площадь чувствительного элемента люксметра.

Таким образом, внешняя квантовая эффективность возрастет в итоге примерно в 4 раза и будет равна 0,44, что находится в хорошем совпадении с литературными данными для данного типа покупного светодиода.

Заключение. Разработана методика определения внешней квантовой эффективности для синих СИД. Проведены измерения и расчеты внешней квантовой эффективности по алгоритмам разработанной методики. Полученные результаты согласуются с литературными данными.

Разработанная методика измерения внешней квантовой эффективности может использоваться для более точного определения внутренней квантовой эффективности и может быть применена на производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шуберт Ф. Светодиоды / под ред. А.Э. Юновича. – М.: Физматлит, 2008.
2. Крутик М.И. Люмены, кандели, ватты и фотоны. Различные единицы – различные результаты измерения чувствительности телевизионных камер на основе ЭОП и ПЗС / М.И. Крутик, В.П. Майоров // Специальная техника. – 2002. – № 5. – URL: <http://videoscan.ru/page/714> (дата обращения: 5.12.2024).

УДК 621.398

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА РЕГИСТРАЦИИ ЭКГ БОЛЬНЫХ РАННЕГО ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОГО ПЕРИОДА

А.В. Куликов, студент ПИИШ;

Е.И. Тренкаль, доцент каф. КУДР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, artem.kulikov@tusur.ru

Рассматривается алгоритм функционирования устройства регистрации электрокардиограммы у пациентов раннего послеоперационного периода. Актуальность обусловлена высоким риском развития аритмий в первые часы и дни после операции, что требует непрерывного и точного мониторинга для своевременного выявления критических состояний. Предложенный алгоритм основан на использовании временных эпикардальных электродов, которые обеспечивают высокоамплитудный и устойчивый сигнал электрокардиограммы (ЭКГ) с минимальным уровнем шума. Алгоритм включает этапы сбора данных, фильтрации сигналов, анализа сер-

дечного ритма в реальном времени и автоматического оповещения медицинского персонала в случае выявления опасных нарушений.

Ключевые слова: мониторинг, послеоперационный период, эпикардальные электроды, алгоритм, беспроводные технологии, ЭКГ.

Ранний послеоперационный период характеризуется высоким риском развития нарушений ритма сердца (аритмий), таких как фибрилляция желудочков, желудочковая тахикардия и брадиаритмии. Эти состояния могут привести к серьезным осложнениям, включая остановку сердца, что требует немедленного медицинского вмешательства. Существующие системы мониторинга, такие как Холтер-мониторы или беспроводные ЭКГ-устройства, имеют ряд недостатков, включая вероятность ошибки в связи с методом снятия ЭКГ с поверхности кожи и дискомфорт для пациента. Потенциальные проблемы можно исключить снятием ЭКГ напрямую с эпикардальных электродов (ЭЭ) [1], подшиваемых к поверхности сердца пациента после проведения открытой операции.

Высокий риск возникновения осложнений после операции также диктует необходимость локализации пациента в рамках центра оказания помощи [1]. В связи с этим актуальной является разработка системы мониторинга ЭКГ, обеспечивающей сбор и беспроводную передачу данных ЭКГ, а также локализацию пациента [2]. В текущей работе представлен алгоритм функционирования устройства регистрации ЭКГ разрабатываемой системы мониторинга.

Алгоритм функционирования устройства представлен на рис. 1 и включает несколько последовательных этапов, направленных на сбор, обработку и анализ данных, а также оперативное оповещение медицинского персонала в случае выявления критических состояний [3].

Сигналы ЭКГ снимаются с временных ЭЭ, которые подшиваются к сердцу пациента во время кардиохирургической операции. Регистрация сигналов с ЭЭ обеспечивает минимизацию артефактов и искажений, возникающих при движении, тем самым повышая надежность диагностики. Сигнал ЭКГ фильтруется для устранения шумов и помех, вызванных внешними факторами или движением пациента, и преобразуется в цифровой формат аналого-цифровым преобразователем. После этого блок управления устройства выполняет первичную цифровую обработку для устранения помех и запись данных в энергонезависимую память.

После сохранения данных и накопления достаточного объема система переходит к их передаче беспроводным способом по технологии LoRa на базовую станцию для дальнейшей записи на сервер. В результате данные становятся доступными медицинскому персоналу

для анализа и получения уведомлений о критических изменениях состояния пациента. В случае отсутствия возможности передачи происходит дальнейшее накопление данных до возобновления связи с базовой станцией.

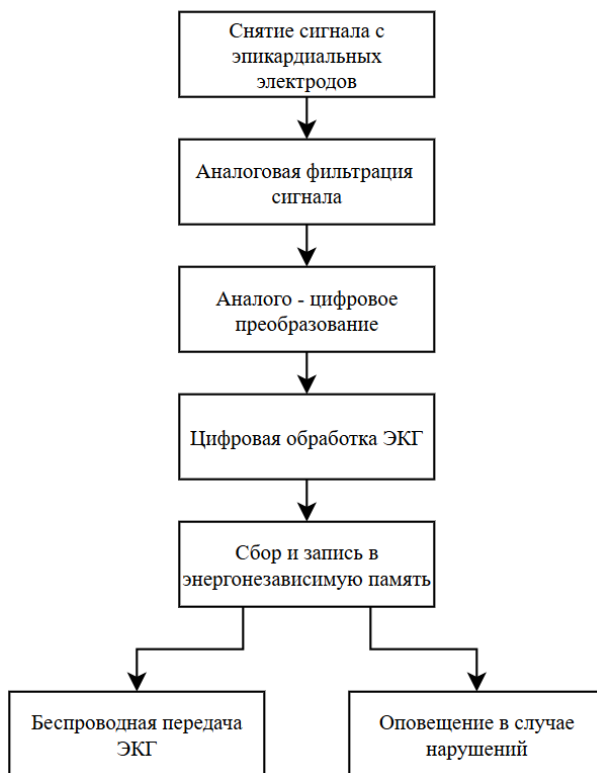


Рис. 1. Алгоритм функционирования устройства регистрации ЭКГ

Блок управления также анализирует данные на предмет нарушений ритма сердца, которые могут свидетельствовать о фибрилляции желудочков, желудочковой тахикардии или брадиаритмии. В случае выявления критических нарушений ритма устройство автоматически передает сигнал тревоги на пульт индикации и базовую станцию. Оповещение включает звуковые и световые сигналы, что позволяет медицинскому персоналу быстро реагировать на изменение состояния пациента.

Таким образом, разработанный алгоритм функционирования устройства мониторинга ЭКГ обеспечивает непрерывный сбор, обра-

ботку и анализ данных ЭКГ в реальном времени, обеспечивает отсутствие потери данных и возможность оперативного оповещения медицинского персонала в случае возникновения чрезвычайных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проект: разработка системы мониторингирования нарушений ритма сердца у больных раннего послеоперационного периода в сердечно-сосудистой хирургии [Электронный ресурс]. – URL: <https://engineers.tusur.ru/projects/728e1462-6e56-43df-8994-da4654b00886> (дата обращения: 04.03.2025).

2. Зелинский И.В. Система мониторинга позиционирования пациента и передачи данных ЭКГ с использованием технологии / И.В. Зелинский, 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. 48–50.

3. 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.

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 534.6.08

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА С ПОМОЩЬЮ РАЗНОСТНО-ФАЗОВОГО МЕТОДА

Е.А. Драч, студент каф. 602 МАИ

*Научный руководитель М.К. Золотенкова, ассистент каф. 704 МАИ
г. Москва, МАИ, rainbow87594@gmail.com*

Приведена методика разработки газосигнализатора, работа которого основана на измерении показателя адиабаты, а также скорости звука как волны. В статье рассмотрен эксперимент по вычислению скорости звуковой волны, распространяющейся в воздушной среде. Расчет основан на применении разностно-фазового метода с использованием известных физических закономерностей. Представлена структурная схема разработанного прототипа устройства. Прикреплены полученные экспериментальные данные.

Ключевые слова: скорость звука, разностно-фазовый метод, частота, синфазный сигнал, длина звуковой волны, микрофон, усилитель звука, формула Лапласа, акустический метод измерений.

Жизнедеятельность человека во многом зависит от окружающей его воздушной среды, состоящей из ряда химических веществ. Существует множество мест, где человек наиболее подвержен влиянию опасных газов в воздухе. Это могут быть заводы, мастерские, шахты и т.д. В связи с этим задача определения качества воздушной среды остается актуальной и по сей день. В СКБ-4 МАИ был разработан прототип газосигнализатора, решающий эту задачу (рис. 1).

Предложенный прототип устройства представляет собой две герметичные камеры, соединенные между собой и внешней средой электромагнитными клапанами. Ко входу первой камеры подключаются обратный клапан и воздушный компрессор. Устройство первой камеры оснащено датчиками температуры, давления, Bluetooth-модулем и микроконтроллером. Наполнение второй камеры будет подробно рассмотрено ниже.

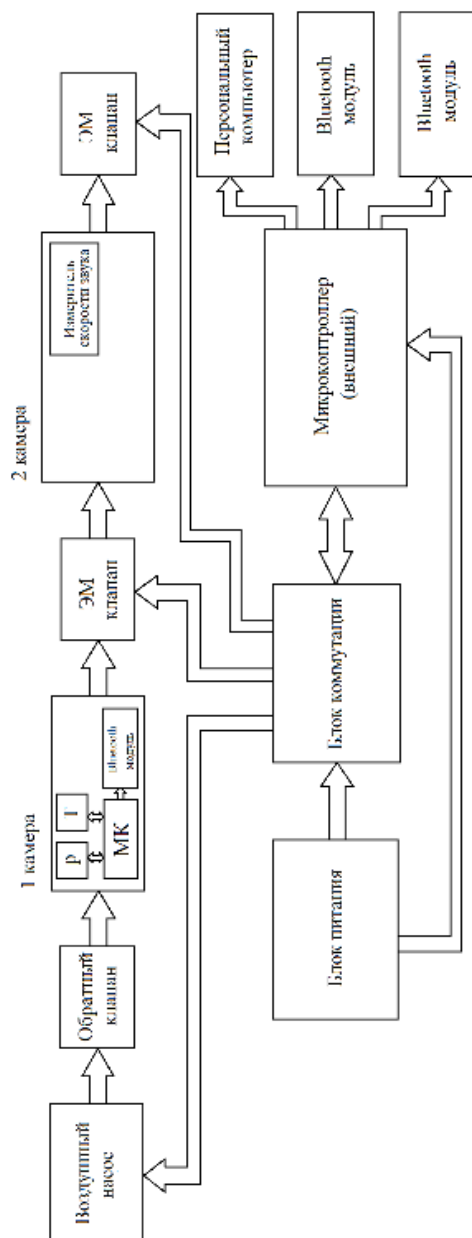


Рис. 1. Структурная схема прототипа газосигнализатора

Управление внутренней электроникой, а также вывод результатов расчетов осуществляются при помощи внешнего микроконтроллера и компьютера.

Принцип работы первой камеры, основанный на методе Клемана–Дезорма, подробно рассматривался в предыдущих трудах [1] по данной теме. Данная работа посвящена второй измерительной камере, структурная схема которой приведена на рис. 2.

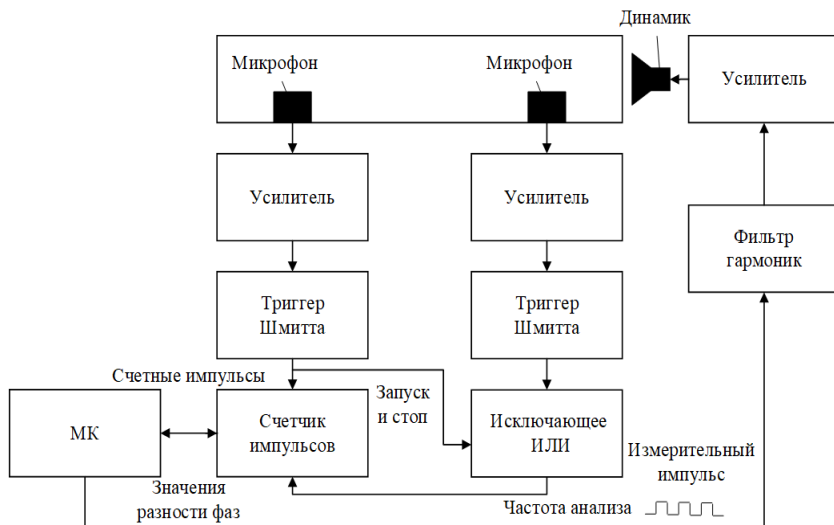


Рис. 2. Структурная схема устройства для измерения скорости звука

Вторая камера (см. рис. 2) представляет собой длинную измерительную трубку, внутренняя поверхность которой покрыта полипропиленовой пленкой, с целью исключения отражения звуковой волны от внутренних стенок и минимизации помех. С внешней стороны располагается микроконтроллер, подключающийся к фильтру гармоник и усилителю внешнего динамика. Во внутренней части трубки располагаются два микрофона. Оба микрофона имеют подключения к усилителям. Помимо этого, к ним подключается триггер Шмитта, чтобы убрать помехи и корректно измерять фазу. Далее триггеры подключаются к логическому элементу «Исключающее ИЛИ» [2], на выходе которого формируются импульсы (сигнал разрешения), ширина которых пропорциональна разнице фаз между сигналами с микрофонов. Данный импульс поступает на разрешающий вывод счётчика импульсов, на счётный вход которого поступают счётные импульсы от МК. Количество импульсов, посчитанное за интервал высокого уровня

сигнала разрешения, пропорционально разнице фаз между сигналами микрофонов [3].

Измерение скорости звука происходит посредством разностно-фазового метода. Логика эксперимента заключается в том, что когда наблюдается синфазность сигналов, становится возможным определить скорость прохождения звуковой волны. Микроконтроллер формирует периодический сигнал в форме меандра [4], который поступает на фильтр гармоник. Данный фильтр оставляет только основную частоту, которая поступает на динамик. При синфазном сигнале с обоих микрофонов можно делать вывод о том, что на расстоянии между микрофонами в пространстве второй камеры укладывается четное число полувольт (n длин волн акустического колебания).

После получения информации о том, что оба сигнала имеют одну фазу, становится возможным определить скорость звука по формуле (1):

$$f_i^l / n_i = v_i, \quad (1)$$

где f_i – частота звуковой волны, l – длина измеряемой камеры, n_i – число длин волн.

Длина измерительной камеры является известным значением, которое определяется расстоянием между микрофонами внутри трубы, в нашем случае $l = 1,27$ м.

Основываясь на методике расчетов, были подобраны подходящие синфазные сигналы (рис. 3).

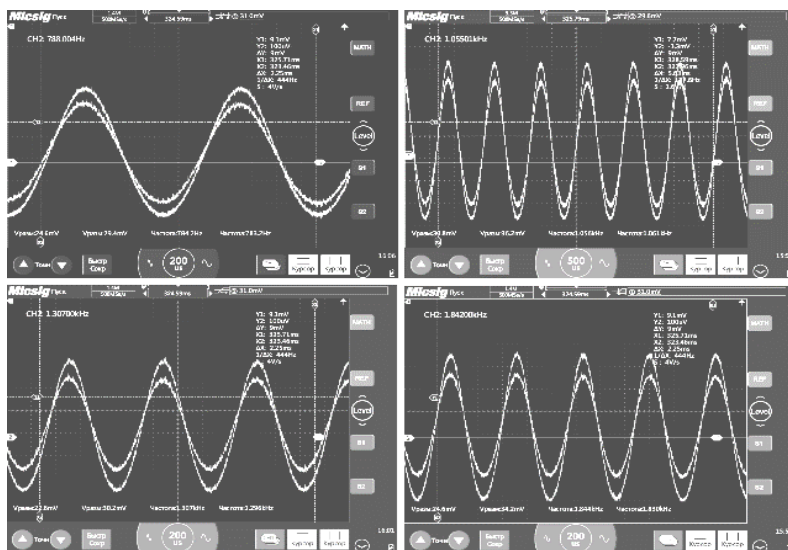


Рис. 3. Показания с осциллографа

Стоит отметить, что скорость распространения звуковой волны в воздухе зависит от состояния окружающей среды. Например, при температуре $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и влажности воздуха $P = 50\%$ скорость звука составляет 343 м/с. В результате проведения эксперимента был получен ряд значений и, по формуле (1) вычислены соответствующие им скорости звука (таблица).

Экспериментальные данные

Частота, f , Гц	Скорость звука, v , м/с
788	343,59
1 055	344,96
1 314	343,76
1842	344,19

Описанный в данной статье метод позволяет довольно просто и точно определять значение скорости звука в воздухе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Драч Е.А. Разработка прототипа и методики газосигнализатора / Е.А. Драч, В.В. Егоров // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2024. – № 7. – С. 194.
2. Иноземцев В.А. Изучение элементной базы цифровой техники. – Брянск: Изда-во БГУ, 2002. – 110 с.
3. Жмудь В.А. Повышение точности и надежности измерения разности фаз / В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, Л.В. Димитров // Автоматика и программная инженерия. – 2017. – № 1 (19). – С. 83–96.
4. Измерения в электронике: справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов и др.; под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с.

УДК 681.178.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ НА ОСНОВЕ DMP И ФИЛЬТРА МАДЖВИКА

О.В. Кустов, магистрант ПИШ;

Е.И. Тренкаль, доцент каф. КУДР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, ИОА СО РАН, sertyky78@gmail.com

Рассматривается задача определения траектории движения буровой установки в породах без применения внешних устройств отслеживания. Приведены результаты измерения траектории в полевых условиях на основе технологии MEMS-датчиков с различными способами обработки данных в мировых системах координат.

Ключевые слова: траектория, инклинометрия, акселерометр, гироскоп, магнитометр, MEMS.

Наклонно-направленное бурение – технология, широко применяемая в нефтяной промышленности для формирования новых скважин или увеличения количества забоев с целью интенсификации дебита уже функционирующих скважин. Для обеспечения попадания забоя формируемой скважины или ветви в заданную точку и соблюдения проектных профилей необходимо точное отслеживание положения бурового элемента в пространстве [1, 2].

В отличие от более традиционных систем забойного или роторного бурения для технологии формирования каналов на основе разрушения пород жидкостью с использованием гидромониторной насадки задача определения траектории на текущий момент не решена. Основной сложностью являются габаритные ограничения, приводящие к невозможности использования классических методов определения траектории буровой установки.

Потенциально задача может быть решена устройством, базирующимся на малогабаритных инерциальных MEMS-датчиках [3], методом инклинометрии, т.е. на основе измерения углов наклона объектов по отношению к гравитационной вертикали [4]. В контексте отслеживания траектории движения тела инклинометрия находит применение благодаря своей способности точно определять изменения угловой ориентации объекта в пространстве.

Цель работы – исследование поведения алгоритмов трекинга траектории с помощью инерциальных датчиков при разных конфигурациях траектории.

Для определения угловой скорости и акселерации разработан макет на базе микросхемы MPU6050. Исследовались два режима: 1) на основе внутренней обработки углов с помощью встроенного блока DMP (Digital Motion Processor); 2) на основе преобразования фильтром Маджвика [5], объединяющего измеренные данные акселерометра, гироскопа и магнитометра. Благодаря магнитометру положение устройства определяется в мировых координатах по всем осям.

Экспериментальное исследование было выполнено на двух объектах различной конфигурации: «Дорога» (рис. 1, *а*); «Ипподром» (рис. 2, *а*). Испытывалась работа инклинометра с применением DMP и фильтра Маджвика (рис. 1, 2, *б*).

При обработке данных с помощью DMP происходит постепенное накопление ошибки (см. рис. 1, *б*). Из рис. 2, *б* видно, что при пологих поворотах с большим радиусом DMP некорректно определяет угловую скорость, а фильтр Маджвика дает корректную траекторию.

Дополнительно проведено измерение с использованием фильтра Маджвика на Ново-Соборной площади г. Томска (рис. 3). При резких

изменениях инерциальных значений фильтр в большей пропорции использует значения гироскопа, благодаря чему корректно оцениваются углы.

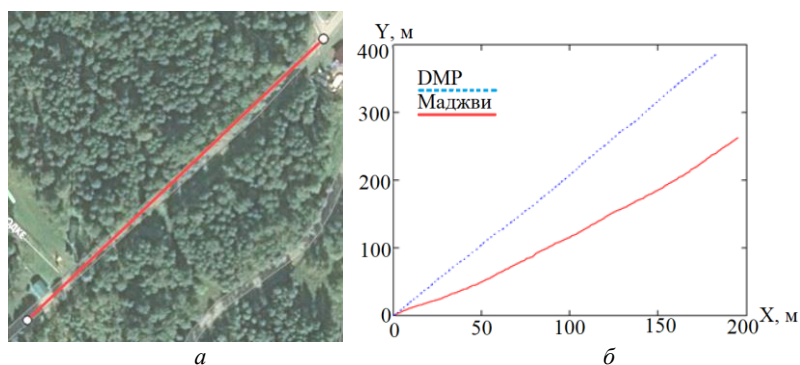


Рис. 1. Траектория «Дорога» фактическая (а) и измеренная с помощью DMP, фильтра Маджвика (б)

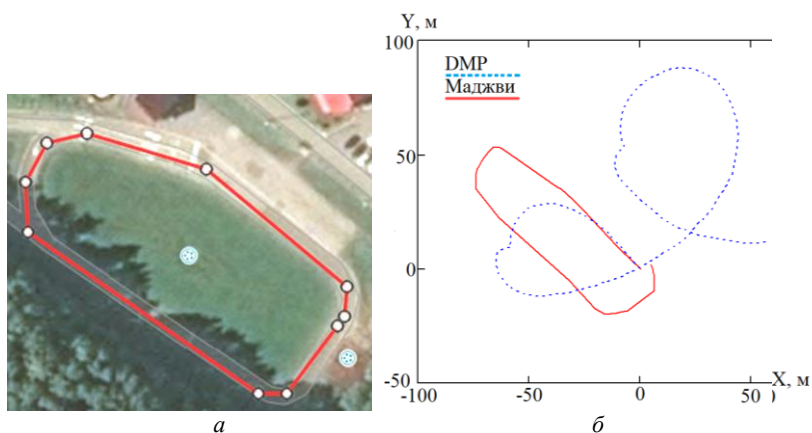


Рис. 2. Траектория «Ипподром» фактическая (а) и измеренная с помощью DMP, фильтра Маджвика (б)

На длинных участках фильтр опирается в большей пропорции на магнитометр, при этом измеренные значения сопровождаются его значительными отклонениями (искривление между поворотами 2 и 3), что искажает рассчитанную траекторию.

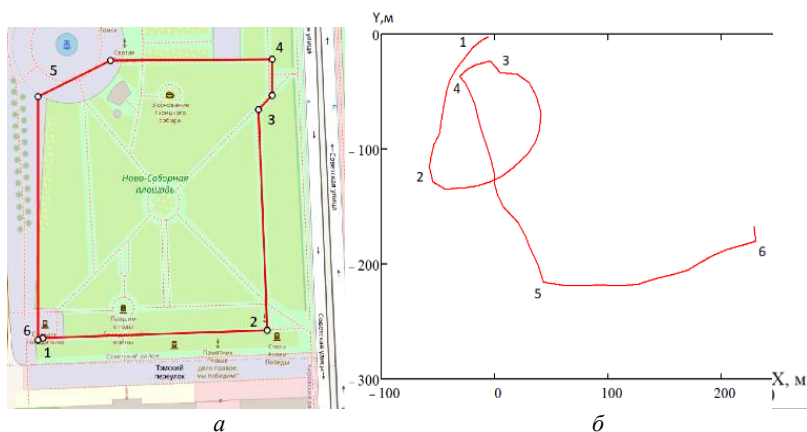


Рис. 3. Траектория «Площадь» фактическая (а)
и измеренная с помощью фильтра Маджвика (б)

В результате измерений получены траектории двух алгоритмов с различными конфигурациями и продолжительностью. На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что использование фильтра Маджвика более перспективно. Применение данного фильтра увеличит точность определения траекторий с применением MEMS-датчиков, что расширит возможности технологии трекинга малогабаритных устройств в различных сферах применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савоськин С.В. Наклонно-направленное разведочное бурение: преимущества, проблемы и способы их решения / С.В. Савоськин, И.Н. Шведова // Геология, география и глобальная энергия. – 2015. – № 9. – С. 18–21.
2. Радиальное вскрытие пласта как метод интенсификации добычи в процессе ГРП / А.В. Антохин, И.А. Лягов, А.И. Баширов, В.А. Макаренко // Бурение и нефть. – 2023. – № 11. – С. 9–12.
3. Шахнович И. MEMC-гироскопы – единство выбора [Электронный ресурс]: электрон. журн. – URL: https://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_512_885.pdf (дата обращения: 04.05.2024).
4. Исаченко В.Х. Инклинометрия скважин. – М.: Недра, 1987. – 216 с.
5. Madgwick [Электронный ресурс]: электрон. журн. – URL: https://x-io.co.uk/downloads/madgwick_internal_report.pdf (дата обращения: 04.05.2024).

СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОМ-ИЗМЕРИТЕЛЕМ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ФОТОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

М.А. Мотовилов, студент

Научный руководитель И.В. Юнусов, вед. н.с. ЛИОР, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, mark.a.motovilov@tusur.ru

Представлены разработанная концепция и схема малогабаритного источника-измерителя с цифровым блоком управления для повышения эффективности тестирования фотонных интегральных схем. Разработанный цифровой блок управления спроектирован на базе микроконтроллера ESP-32, программируется на языке С и взаимодействует с другими устройствами схемы с помощью последовательного периферийного интерфейса.

Ключевые слова: источник/измерительный блок, SPI, преобразователь сигналов, фотонная интегральная схема.

В настоящий момент тестирование интегральных аналоговых ФИС с помощью источников-измерителей SMU (Source Measuring Unit) имеет ряд проблем, связанных с габаритами источников, количеством измеряемых портов, диапазоном измеряемых и задаваемых значений токов и напряжений. Например, для уменьшения времени измерений токов и напряжений для аналогового оптического переключателя матриц необходимо параллельно производить операции подачи и получения сигнала с 74 портов. Линейка моделей SMU Keysight от американской компании Keithley представляет собой источники питания с четырёхквadrантными диапазонами напряжения от -100 до $+100$ В, -10 А до $+10$ А. Однако число параллельно обрабатываемых каналов обычно ограничивается двумя, что не даёт возможности производить оперативную обработку микросхем с большим количеством выводов. SMU от канадской фирмы National Instruments PXI-1085 способен обрабатывать до 18 каналов, при этом имеет большую габаритность.

Проведя анализ аналогов на мировом рынке, можно сделать вывод, что для обеспечения скорости контроля качества ФИС необходимо разработать универсальное устройство с широким диапазоном токов и напряжений, имеющее небольшие габариты и небольшую стоимость [1].

На данный момент разработана схема SMU, состоящая из отладочной платы Arduino UNO с микроконтроллером Atmega328, электронных изоляторов сигнала, мультиплексоров, сдвиговых регистров, ЦАП и АЦП. На рис. 1 представлен алгоритм работы разрабатываемого SMU в виде блок-схемы.

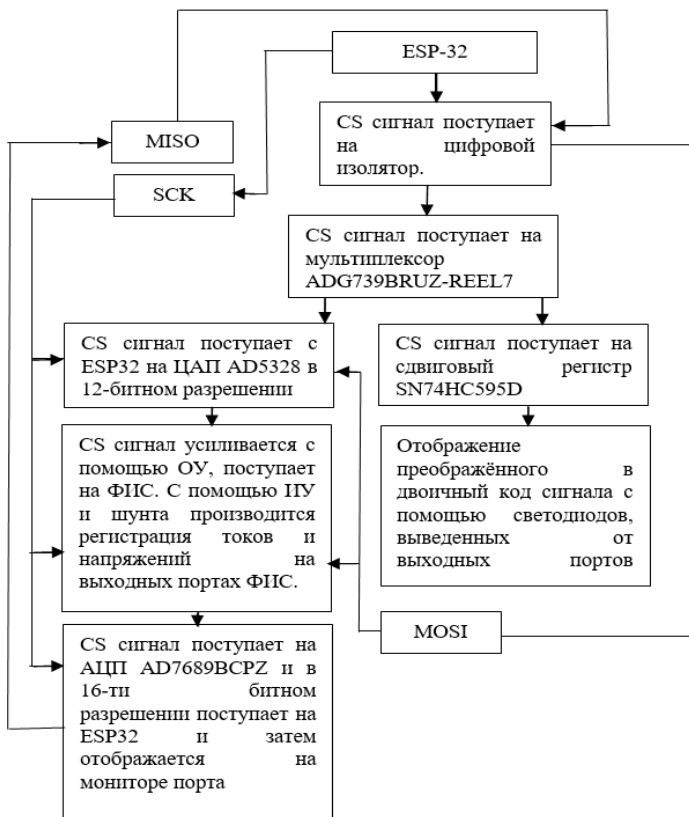


Рис. 1. Структурно-функциональная схема работы SMU в виде блок-схемы

В качестве микропроцессора в дальнейшем планируется использование ESP32 ввиду его высокой производительности и широкого выбора поддерживаемых интерфейсов и протоколов. Для обеспечения коммуникации между ведущим микроконтроллером и ведомыми устройствами в виде цифроаналогового (ЦАП) и аналого-цифрового преобразователей (АЦП) было принято использовать интерфейс SPI [2]. Выходные порты SPI на ESP32 подключаются к цифровому изолятору для снижения внутренних шумов [3]. Затем с помощью 16-канальных мультимплексоров ADG739BRUZ-REEL7 производится умножение CS-сигналов, активирующих ведомое устройство, до необходимых значений. CS-сигнал (Chip Select) – это порт, предназначенный для активации ведомого устройства. Так как на платах Arduino количество выходных цифровых портов ограничено, то наибо-

лее оптимальный способ увеличить количество CS-выводов с помощью мультиплексоров. Использование мультиплексоров ADG739BRUZ-REEL7 на 16 выходных портов позволяет подключить 8 тестируемых ФИС. От мультиплексора CS-сигналы поступают на 8-канальный 12-битный ЦАП, где для определения тока и напряжения между двумя портами будут задействованы два канала, один для определения силы тока, проходящего через порт на ФИС, второй для определения величины напряжения между портами. Определение тока и напряжения производится с помощью инструментальных усилителей AD8226. Затем значения передаются через АЦП на ESP32, преобразовываясь в 16-битное значение. Чтобы определить корректность подаваемого сигнала на ФИС, сигнал, преобразованный в двоичный код, поступает на сдвиговые регистры SN74HC595D и отображается в виде параллельного сигнала на светодиодах, подключенных к выходным портам регистров. SCK-сигнал используется для синхронизации при передаче данных. Шина MOSI предназначена для последовательной передачи данных от ведущего к ведомому. Шина MISO предназначена для последовательной передачи данных от ведомого к ведущему [6].

Дальнейшие исследования будут направлены на улучшение алгоритмов обработки данных, увеличение количества каналов до 86, для успешного тестирования нейроморфных перемножителей, с помощью использования восьми мультиплексоров ADG739BRUZ-REEL7 и расширение функциональных возможностей схемы, что позволит повысить ее универсальность и адаптивность к различным условиям тестирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта FEWM 2024-0004.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белл Д.А. Электронные измерения и приборы // Электронные измерения и приборы. – 2006. – С. 1–450.
2. Иванов С.П. Микроконтроллер ESP32: возможности и применение в современных устройствах // Радиотехника. – 2021. – Т. 29, № 4. – С. 78–83.
3. Петрова Е.А. Цифровые изоляторы в системах управления: принципы работы и применение // Электронные технологии. – 2020. – Т. 15, № 1. – С. 25–30.
4. Axelson J. Serial Port Complete: The Developer's Guide. – 2nd ed. – Lakeview Research, 2003. – 600 p.
5. Федоров В.А. Применение интерфейса SPI в системах управления // Научные труды МГТУ. – 2022. – Т. 24, № 2. – С. 100–105.
6. Михайлов А.В. Цифровые устройства и системы: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ, 2015. – 320 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ОТКРЫТОГО КОНЦА
КОАКСИАЛЬНОЙ ЛИНИИ**

*Д.С. Фадеева, студентка ПИШ; С.А. Подлиннов, магистрант
каф. РСС; И.А. Резаев, аспирант каф. РСС*

*Научный руководитель А.В. Фатеев, доцент, зав. каф. РСС, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, spodlinnov@gmail.com*

Представлена оценка диэлектрических свойств материалов методом открытого конца коаксиальной линии. Оценка проводилась путем построения математической модели для расчета комплексной относительной диэлектрической проницаемости из комплексного коэффициента отражения исследуемого материала, полученного экспериментальным путем с помощью векторного анализатора цепей. В качестве исследуемого материала использовался образец фторопласта-4. Для верификации проведенных исследований был осуществлен расчет относительной погрешности измерений.

Ключевые слова: высокочастотные измерения, открытый конец коаксиальной линии, комплексная относительная диэлектрическая проницаемость, комплексный коэффициент отражения.

Исследование зависимости диэлектрических и магнитных свойств материалов от таких параметров, как температура, частота, давление, напряженность электрического поля, играет весомую роль в науке и технике. Данное исследование предоставляет возможность рассмотреть закономерности строения молекул и получить изоляционные материалы с заданными свойствами, необходимые при конструировании устройств.

В настоящее время известно множество математических алгоритмов, позволяющих исследовать диэлектрические свойства, а также другие параметры материалов на широких диапазонах частот. Одним из наиболее широко применяемых методов является метод открытого конца коаксиальной линии.

Суть исследуемого метода заключается в измерении только одного параметра матрицы рассеяния образца, а именно – комплексного коэффициента отражения (ККО), путем подключения открытой коаксиальной линии к одному из портов векторного анализатора цепей и последующего вычисления комплексной относительной диэлектрической проницаемости (КОДП) образца [1]. Измерение ККО проводится при контакте открытого сечения линии с образцом. Структурная и эквивалентная схемы экспериментальной установки представлены на рис. 1, а, б [2].

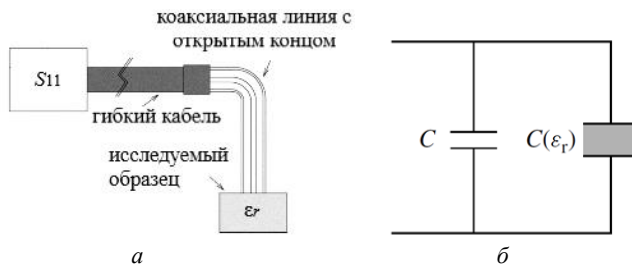


Рис. 1. Система измерений: структурная схема установки – *а*; и ее эквивалентная схема – *б*

С помощью эквивалентной схемы можно установить зависимость КОДП исследуемого образца от его ККО.

После определенных математических преобразований процесс оценки КОДП сводится до двух простых шагов. В первую очередь проводится калибровка измерительной установки путем измерения ККО эталонных нагрузок – холостого хода (ХХ), короткого замыкания (КЗ) и согласованной нагрузки (СН), в качестве которой необходимо применять материал с известными диэлектрическими свойствами. Например, деионизированную воду. Затем осуществляется расчет калибровочных коэффициентов, как показано в выражениях (1)–(3) [1].

$$A_1 = [\epsilon_{CH}(\Gamma_{KЗ} - \Gamma_{CH}) - (\Gamma_{KЗ} - \Gamma_{ХХ})] / (\Gamma_{CH} - \Gamma_{ХХ}), \quad (1)$$

$$A_2 = [\epsilon_{CH}\Gamma_{ХХ}(\Gamma_{KЗ} - \Gamma_{CH}) - \Gamma_{CH}(\Gamma_{KЗ} - \Gamma_{ХХ})] / (\Gamma_{KЗ} - \Gamma_{ХХ}), \quad (2)$$

$$A_3 = \Gamma_{KЗ}, \quad (3)$$

где $\Gamma_{ХХ}$, $\Gamma_{KЗ}$ и Γ_{CH} – измеренные ККО эталонных нагрузок; ϵ_{CH} – КОДП эталонного образца.

Далее необходимо провести измерение ККО Γ исследуемого образца и расчет его КОДП, как показано в выражении (4) [1]:

$$\epsilon_r = \frac{A_1\Gamma - A_2}{A_3 - \Gamma}. \quad (4)$$

Соответственно, на основе описанного математического алгоритма был проведен эксперимент, в ходе которого оценивалась КОДП образца фторопласта-4 толщиной 2,1 мм. Результаты проведенного эксперимента представлены на рис. 2. Так как фторопласт-4 обладает известной КОДП, на графиках дополнительно были представлены значения его КОДП, а также рассчитана относительная погрешность измерений, представленная на рис. 3.

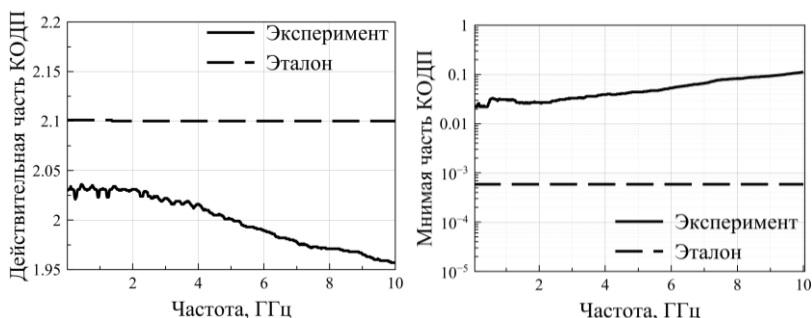


Рис. 2. Сравнение результатов расчета КОДП фторопласта-4 и его эталонных значений

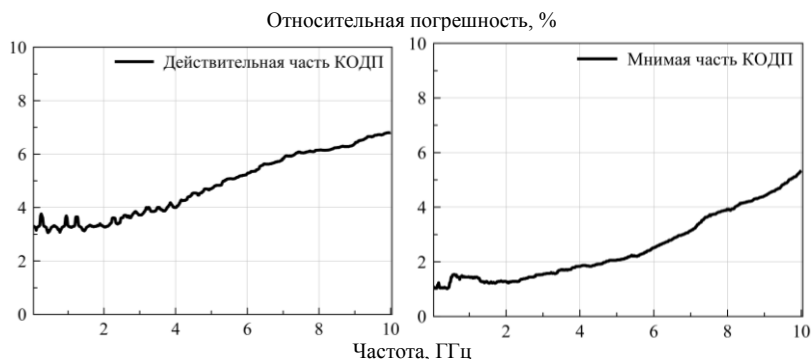


Рис. 3. Относительная погрешность измерений КОДП

Из полученных графиков видно, что в случае с действительной и мнимой частями КОДП относительная погрешность измерений не превышает восьми процентов для реальной части и не превышает шести процентов для мнимой части КОДП. Точность измерений КОДП методом открытого конца коаксиальной линии можно повысить, усложнив модель измерительной системы, путем добавления потерь на излучения и дополнительных калибровочных стандартов. Выбранная толщина диэлектрика (2,1 мм) обеспечивает минимальное влияние подложки за диэлектриком на результат измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Šarolić A. Dielectric permittivity measurement using open-ended coaxial probe-Modeling and simulation based on the simple capacitive-load model / A. Šarolić, A. Matković // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, No. 16. – P. 6024.
2. Yaw K.C. Measurement of dielectric material properties // *Application Note*. Rohde & Schwarz. – 2012. – P. 1–35.

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 537.533.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ ЭМИССИОННОГО ЭЛЕКТРОДА ФОРВАКУУМНОГО ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

*А.В. Долгова, Ж.Э. Дагри, аспиранты каф. физики;
А.С. Климов, проф. каф. физики, д.т.н.
г. Томск, ТУСУР, weatheraregood@gmail.com*

Проведены результаты исследования влияния формы и размеров эмиссионных отверстий в эмиссионном электроде на его температуру и максимальное термическое расширение. Определено, что наименьшее значение термического расширения может быть получено для электрода с 15 прямоугольными отверстиями размером $12 \times 5 \text{ мм}^2$ каждое, расположенными в 1 ряд.

Ключевые слова: источник электронов, ленточный электронный пучок, эмиссионный электрод, температура нагрева, термическое расширение.

Ленточные электронные пучки применяются в различных отраслях науки и техники. Такие пучки могут применяться для осуществления плазмохимических реакций, травления, осаждения различных покрытий [1], а также в качестве неинвазивного метода диагностики интенсивных пучков заряженных частиц [2].

В процессе работы источника его электроды подвергаются воздействию потоков ионов и электронов, что приводит к повышению температуры электродов, которые невозможно технически охлаждать проточной водой. Нагрев эмиссионного электрода в процессе работы электронного источника вызывает деформацию как самого электрода, так и расположенной на нем эмиссионной сетки, что оказывает негативное влияние на однородность тока извлекаемого электронного пучка и работоспособность источника электронов.

Целью данной работы является определение влияния формы эмиссионных отверстий на максимальные значения термического расширения и температуры эмиссионного электрода.

Методика эксперимента. Нагрев эмиссионного электрода в общем виде может быть описан уравнением Фурье–Кирхгофа:

$$\rho \cdot C_p \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla(-\lambda \cdot \nabla T) = Q,$$

где $\rho = 7630 \text{ кг/м}^3$ – плотность материала; $C_p = 470 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ – теплоемкость; $\mathbf{u}$ – вектор скорости движения потока тепла; ∇ – оператор Гамильтона; T – температура; $\lambda = 15 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ – коэффициент теплопроводности; Q – тепловой поток.

Термическое расширение, возникающее под действием температуры, описывается выражением

$$d = \alpha(T - T_0),$$

$\alpha = 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ – средний коэффициент термического расширения; T – температура, до которой произошел нагрев; T_0 – начальная температура.

Расчет проводился для 5 эмиссионных электродов, отличающихся формой, количеством отверстий (таблица). Площадь открытой части эмиссионного окна при этом выбиралась не менее 75% от площади прямоугольного отверстия размером $10 \times 100 \text{ мм}^2$.

Форма и размеры эмиссионных отверстий

№	Форма и размеры эмиссионных отверстий	Площадь эмиссионной поверхности, %
1	1 прямоугольное отверстие размером $10 \times 100 \text{ мм}^2$	100
2	10 прямоугольных отверстий, расположенных в 2 ряда, размером $5 \times 20 \text{ мм}^2$ каждое	100
3	9 квадратных отверстий, расположенных в 1 ряд, размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$ каждое	90
4	15 прямоугольных отверстий, расположенных в 1 ряд, размером $10 \times 5 \text{ мм}^2$ каждое	75
5	15 прямоугольных отверстий, расположенных в 1 ряд, размером $12 \times 5 \text{ мм}^2$ каждое	90

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 приведены зависимости максимального термического расширения (рис. 1, а) и максимальной температуры эмиссионного электрода (рис. 1, б) от плотности теплового потока, создаваемого разрядной плазмой и обратным потоком ионов из ускоряющего промежутка в процессе работы электронного источника для различных форм эмиссионных отверстий.

Из рис. 1 видно, что наблюдается линейная зависимость максимального термического расширения и максимальной температуры

эмиссионного электрода от плотности теплового потока для всех рассмотренных форм эмиссионных отверстий.

Максимальная температура, до которой нагревается электрод № 1, наименьшая из всех. В то же время максимальное термическое расширение под действием температуры для указанной формы имеет наибольшее значение.

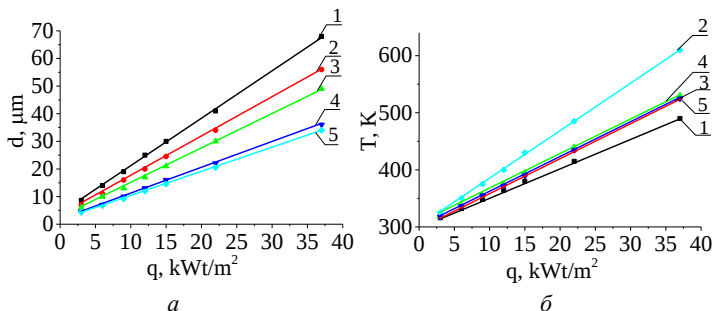


Рис. 1. Зависимость максимального термического расширения (а) и максимальной температуры эмиссионного электрода (б) от плотности теплового потока: 1 – форма № 1; 2 – форма № 2; 3 – форма № 3; 4 – форма № 4; 5 – форма № 5

Максимальная температура, до которой нагреваются электроды с № 3–№ 5, практически одинакова, в то время как максимальное термическое расширение под действием температуры значительно меньше для форм, где эмиссионные отверстия представляют собой 15 прямоугольников (формы № 4 и № 5). Наименьшее влияние термического расширения получено для вставки с формой эмиссионных отверстий № 5 – с 15 прямоугольными отверстиями, расположенными в 1 ряд размером $12 \times 5 \text{ мм}^2$ каждое.

Закключение. В результате проведенного исследования определено, что путем подбора формы и размеров эмиссионных отверстий можно добиться уменьшения влияния термического расширения вставки в процессе работы электронного источника.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-29-00358.

ЛИТЕРАТУРА

1. Klimov A. Forevacuum Plasma Source of a Ribbon Electron Beam for Beam Plasma Generation / A. Klimov, A. Zenin // 20th International Symposium on High-Current Electronics (ISHCE). – Tomsk: IEEE, 2018. – P. 33–34.
2. Fork P. Minimal invasive beam probe monitors for high intense hadron beams // Proc. PAC. – Kyoto: JACoW, 2010. – P. 1261–1265.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕМРИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ГАФНИЯ С Т-ОБРАЗНОЙ ТОПОЛОГИЕЙ

М.А. Свириденко, аспирант каф. ФЭ; Р.Ж. Касеинов, магистр;

В. Кирнев, студент; Н.А. Шулаев, аспирант;

С.Ю. Удовиченко, проф. каф. ПИТФ, д.ф.-м.н., ТюмГУ

Научный руководитель П.Е. Троян, проф. каф. ФЭ, д.т.н.

г. Томск, ТУСУР, sviridenmkm687@gmail.com

Рассмотрена одна из проблем низкой повторяемости мемристонных устройств – нарушение равномерной толщины пленок в активной области. Предложена технология изготовления мемристоров на основе HfO_2 с Т-образной топологией верхнего электрода, нивелирующего этот дефект. Следуя разработанной топологии, изготовлена партия мемристоров. Измерены вольт-амперные характеристики изготовленных мемристоров.

Ключевые слова: мемристоры, магнетронное напыление, энергонезависимая память, оксид гафния, дефекты топологии.

Разработка эффективной энергонезависимой памяти высокой плотности (ReRAM) остается актуальной задачей современной твердотельной электроники [1]. Использование оксида гафния в качестве активного слоя мемристоров является перспективным направлением, позволяющим улучшить электрические характеристики, повысить надежность, миниатюризировать устройство [2].

Одной из проблем при формировании мемристорных структур является образование «ребер» (рис. 1, *а*) на краях элементов, напыляемых через полимерную маску. В этих местах слои материала частично ложатся на стенку маски, образуя неконтролируемые дефекты, а также образуются области меньшей толщины (см. рис. 1, *б*). Такие дефекты могут привести к пробоем [3], как на рис. 1, *а*.

Работа сфокусирована на разработке технологии изготовления мемристоров, нивелирующей проблему образования «ребер», и областей малой толщины.

Суть технологии состоит в последовательном использовании методов магнетронного напыления тонких пленок и плазмохимического травления (ПХТ) для получения Т-образной топологии структуры, позволяющей исключить процесс планаризации.

Первым этапом через маску на подложке из SiO_2 формируются нижние электроды с контактными площадками W/Al , где W – выступает как адгезионный подслои, Al – защитный слой для процесса ПХТ в SF_6 . Следующим этапом, через новую маску, формируется мемри-

сторная структура вместе со вспомогательным слоем вольфрама TiN/HfO₂/TiN/W. После через новую маску формируется пин на поверхности W и проводится процесс ПХТ, в котором удаляется незакрытая часть вспомогательного слоя W и TiN на интерфейсе мемристора. Каждый слой формируется в форме ступеньки, что обеспечивает достаточную толщину пленки изолятора (SiO₂ 100 нм), нанесенную через третью маску, и верхнего электрода (W 100 нм) на всем их протяжении, что снижает риск пробоя. Топология и внешний вид изготавливаемой структуры показаны на рис. 2.

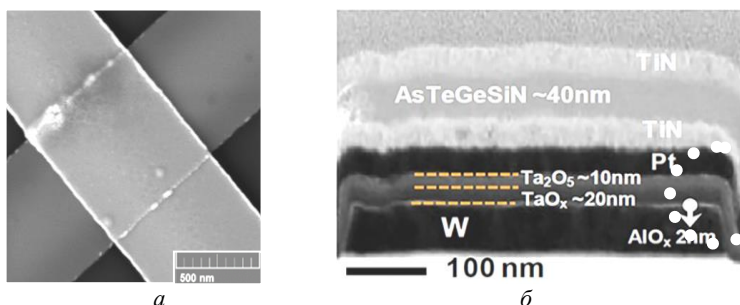


Рис. 1. Прогорание ячейки памяти на границе слоев – *а*; возникновение областей утоньшения при формировании мемристорного кроссбара – *б* [4].

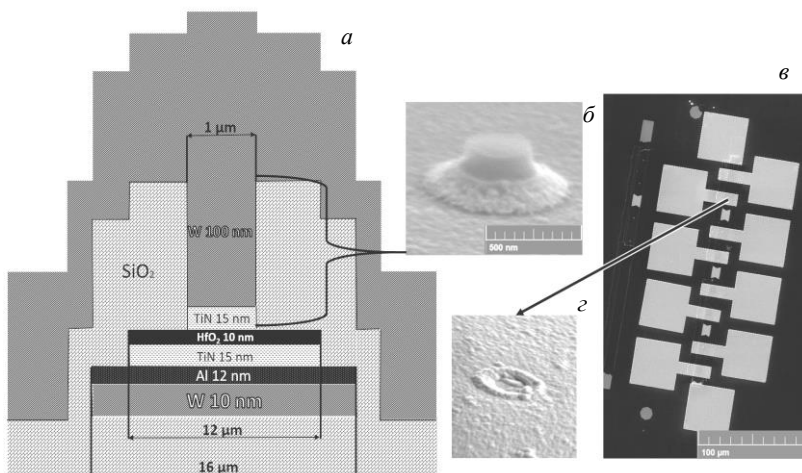


Рис. 2. Схема поперечного сечения мемристоров TiN/HfO₂/TiN с Т-топологией – *а*; мемристор до нанесения верхнего электрода и изолятора – *б*; топология мемристорного кроссбара – *в*; мемристор под верхним электродом – *г*. Толщины слоев указаны на рисунке рядом с названием материала

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) мемристорных структур (рис. 3) после их изготовления измерялись на зондовой станции EB-8 с использованием источника-измерителя тока и напряжения Keithley 2400.

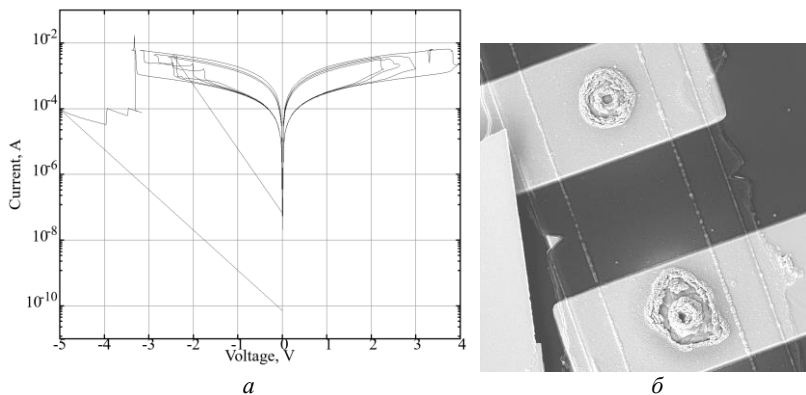


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики мемристора $\text{TiN}/\text{HfO}_2/\text{TiN}$ – *а*; мемристоры после измерений при высоком напряжении $>3,5$ В – *б*

На вольт-амперной характеристике наблюдается устойчивое переключение из состояния с низким сопротивлением в состояние с высоким сопротивлением, которое сохраняется при нескольких циклах. Рассчитанное значение ($R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$) составило 4. При этом наблюдалась тенденция роста напряжения переключения в циклах. В конечном итоге его значение превысило электрическую прочность активного слоя, произошел пробой (см. рис. 3, *б*). Это видно на последней линии ВАХ. Важно отметить, что разрушение началось не на границе слоёв, где видны дефекты, а в области формирования мемристора, что говорит об исключении проблем топологии из эксперимента. Для улучшения электрических свойств мемристора в дальнейшем достаточно работы над составом и морфологией активного слоя.

Исследования подтвердили стабильное переключение мемристора, сохраняющееся на протяжении нескольких циклов без повреждений в местах потенциальных пробоев. Разработана методика создания мемристоров на основе HfO_2 с использованием Т-образной топологии верхнего электрода, без использования методов планаризации. Последовательное нанесение тонких металлических слоев вместе с ПХТ позволило создать структуру, подходящую для высокоплотной энергонезависимой памяти.

Исследование проведено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект FEWZ-2024-0020) в Центре природоохлажденного инжиниринга ТюмГУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свириденко М.А. Влияние соотношения микрорельефа электрода и толщины электрического слоя на электрическую прочность и напряжение формовок тонкопленочных структур металл-диэлектрик-металл / М.А. Свириденко, П.Е. Троян. – Томск: ТУСУР, 2023. – 13 с.
2. Influence of Fabrication Modes on Magnetron-Sputtered ZrO_2 -Based Memristors' Properties / A.N. Bobylev, A.A. Gubin, M.A. Sviridenko, N.A. Shulaev, S.Yu. Udovichenko // IEEE. 25th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 28 June – 02 July 2024. – 2024. – P. 30–33. DOI:10.1109/EDM61683.2024.10615035.
3. Воробьев Г.А. Пробой тонких диэлектрических пленок. – М.: Сов. радио, 1977. – 72 с.
4. Highly-scalable threshold switching select device based on chalcogenide glasses for 3D-nanoscaled memory arrays / L. Myoung-Jae, L. Dongsoo, K. Hong, C. Hyun-Sik, P. Jong-Bong, K. Hee Goo, C. Young-Kwan // Electron Devices Meeting (IEDM), IEEE International. – 2012. – P. 446–716.

УДК 537.525

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДЕРЖКИ ИНИЦИИРОВАНИЯ МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА В ФОРВАКУУМНОМ ПЛАЗМЕННОМ ИСТОЧНИКЕ ЭЛЕКТРОНОВ

В.Е. Аркатов, аспирант; А.В. Казаков, с.н.с. каф. физики, к.т.н.;

Н.А. Панченко, доцент каф. физики, к.ф.-м.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. физики, valerii.e.arkatov@tusur.ru

Изучено влияние ускоряющего напряжения, определяющего ток высоковольтного тлеющего разряда в ускоряющем промежутке, на иницирование магнетронного разряда в форвакуумном плазменном источнике электронов. Увеличение ускоряющего напряжения способствует уменьшению задержки иницирования магнетронного разряда.

Ключевые слова: плазменный источник электронов, форвакуумная область давлений, магнетронный разряд.

Плазменные источники электронов с магнетронной разрядной системой, в которой формируется эмиссионная плазма (ЭП) при помощи планарного магнетронного разряда (ПМР), может создавать более высокую плотность тока электронного пучка по сравнению с плазменными источниками на основе тлеющего разряда при давлении

ях 10^{-3} – 10^{-1} Па [1]. В работе [2] изучено влияние на напряжение зажигания планарного магнетронного разряда ионного пучка, инжектированного в разрядную систему магнетронного разряда при давлении газа ниже $8 \cdot 10^{-2}$ Па. В итоге определено, что при бомбардировке катода ионами уменьшается напряжение зажигания по мере увеличения энергии ионов, а также установлена пороговая зависимость напряжения зажигания от тока ионного пучка [2].

Особенность форвакуумных плазменных источников электронов (ФПИЭ) в том, что в них зажигается высоковольтный тлеющий разряд (ВТР) в ускоряющем промежутке при приложении высокого напряжения для извлечения и ускорения электронов [3]. Ионный поток, создаваемый ВТР, проникает в разрядную систему ФПИЭ. В ФПИЭ при использовании ПМР в качестве источника плазмы может наблюдаться влияние ВТР на инициирование ПМР. Целью работы является исследование влияния ускоряющего напряжения, определяющего ток ВТР, на время задержки инициирования ПМР в ФПИЭ.

Экспериментальная установка. Упрощенная схема импульсного форвакуумного плазменного источника электронов с разрядной системой на основе магнетрона и схема эксперимента показаны на рис. 1.

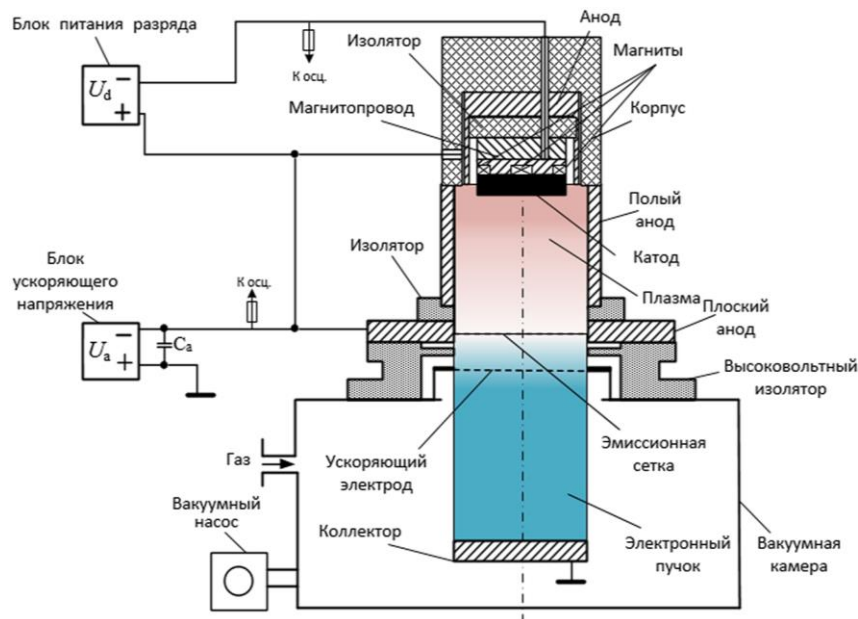


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Анодная часть разрядной системы и ускоряющий промежуток описаны в [4], при этом вместо катодного узла применяется планарный магнетрон с медным катодом (мишенью) диаметром 75 мм, максимальная напряженность магнитного поля вблизи катода – 53 мТл. Питание магнетронного разряда осуществляется импульсным блоком питания разряда, который обеспечивает прямоугольные импульсы напряжения с амплитудой U_{d0} до 1 кВ. Высоковольтный источник напряжения поддерживает постоянное ускоряющее напряжение U_a . Ускоряющее напряжение U_a и напряжение на разрядном промежутке U_d контролировались высоковольтными пробниками напряжения TESTEC HVP-15HF и фиксировались осциллографом Tektronix, на котором определялись моменты подачи импульса с блока питания разряда и зажигания разряда. Газовая среда в вакуумной камере – гелий He, длина ускоряющего промежутка равна 20 мм.

Результаты экспериментов и их анализ. На рис. 2 представлены графики зависимости среднего времени задержки инициирования магнетронного разряда t_d от ускоряющего напряжения U_a при амплитудах импульса напряжения U_{d0} с блока питания 600 и 800 В и давлении газа $p = 17$ Па. Увеличение U_a приводит к меньшему времени задержки, при этом большее напряжение U_{d0} обеспечивает меньшее t_d . Ускоряющее напряжение U_a влияет на время задержки t_d по причине возникновения ВТР в ускоряющем промежутке, так как при увеличении U_a растёт ток ВТР и, следовательно, ионный поток, проникающий в разрядный промежуток через эмиссионный электрод. А при увеличении напряжения на разрядном промежутке U_{d0} увеличивается скорость ионизации газа, поэтому время задержки t_d магнетронного разряда уменьшается с ростом U_{d0} .

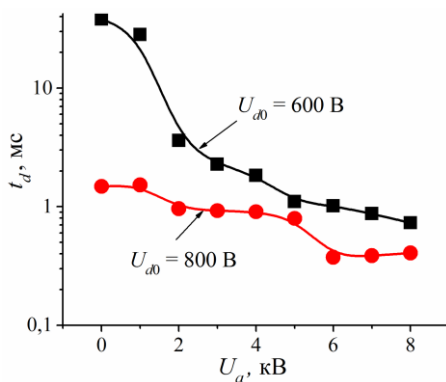


Рис. 2. Графики зависимостей среднего времени задержки t_d инициирования магнетронного разряда от ускоряющего напряжения U_a

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 25-29-00142, <https://rscf.ru/project/25-29-00142/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Получение мощных электронных пучков в магнетронных пушках с холодными вторично-эмиссионными катодами / А.Н. Довбня, В.В. Закутин, Н.Г. Решетняк, В.П. Ромасько, Ю.Я. Волколупов, М.А. Красноголовец // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, № 12. – С. 98–101.
2. Свойства магнетронного разряда низкого давления в условиях инициирования пучком ускоренных ионов эмиссионных процессов на электродах разряда / А.П. Семенов, И.А. Семенова, Д. Цыренов, Э.О. Николаев // Известия вузов. Физика. – 2020. – Т. 63, № 10. – С. 102–108.
3. Форвакуумные плазменные источники электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Ю.Г. Юшков. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – 288 с.
4. 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.

УДК 67.02

ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР С ПРИМЕНЕНИЕМ ТОНКИХ ПЛЕНОК ИТО

В.М. Компаниец, студент

*Научный руководитель И.А. Чистоедова, доцент каф. ФЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, vladkompaniets21@gmail.com*

Приведена технология формирования планарных волноводных структур с применением тонких пленок ИТО, полученных методом реактивного магнетронного распыления в среде аргон/кислород в соотношении 38/17% в течение 20 мин. Описаны режимы, а также даны рекомендации для основных этапов интегральной технологии: очистка подложек, осаждение рабочего слоя, нанесение слоя фоторезиста, экспонирование и травление. Установлено, что при использовании жидкого позитивного фоторезиста ma-P1240 погрешность линейных размеров полученных структур не превышает 6,4%.

Ключевые слова: ИТО, планарные волноводы, волноводные структуры, жидкий фоторезист, S-1813, ma-P1240.

Целью данной работы является разработка технологии формирования планарных волноводных структур с применением тонких пленок ИТО.

Одним из ключевых элементов оптоэлектроники являются волноводы – структуры, позволяющие направлять световые волны с высокой степенью управления. Основой их функционирования является явление полного внутреннего отражения, которое возникает на границе раздела сред с различными показателями преломления. В качестве образца была выбрана структура ИТО-на-стекле ($n_{\text{ИТО}} = 2$, $n_{\text{ст/л}} = 1,6$), которая обеспечивает явление ПВО.

Выбор такой структуры объясняется тем, что тонкие пленки оксида индия-олова (ИТО) обладают высокой прозрачностью в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, а также регулируемой проводимостью и представляют собой перспективный материал для создания активных и пассивных волноводных компонентов. Также стоит учесть простоту получения и малую стоимость такой структуры.

Геометрические параметры волноводов, такие как ширина, высота и угол наклона боковых граней, имеют решающее значение для оптимизации их характеристик и повышения эффективности светопередачи. Правильный выбор этих параметров позволяет добиться максимального уровня полного внутреннего отражения и, как следствие, улучшить качество сигналов, передаваемых через волноводы.

Интегрально-групповой принцип дает возможность изготавливать большое число элементов на единой групповой пластине, однако требует отработанной технологии производства. В основе интегральной технологии изготовления планарных волноводных структур лежат следующие процессы: очистка подложки, осаждение рабочего слоя, нанесение слоя фоторезиста, экспонирование и травление.

Для обеспечения разности показателей преломления были выбраны стеклянные подложки с размерами 26×76 мм. Методом жидкостной химической очистки была проведена обработка поверхности пластин в растворе $\text{H}_2\text{O}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{SO}_4$ при $T=75^\circ\text{C}$ в течение 5 мин [1].

Тонкие пленки ИТО толщиной 90 нм были получены методом реактивного магнетронного распыления при $T = 350^\circ\text{C}$, $I = 150$ мА в среде аргон/кислород в соотношении 38/17% в течение 20 мин. Материал мишени $\text{In}(90\%)/\text{Sn}(10\%)$. Отжиг полученных пленок не проводился.

В качестве фоторезистов были выбраны жидкие позитивные фоторезисты S-1813 и ma-P1240, обеспечивающие разные толщины масок при едином режиме нанесения. Толщина фоторезистивной маски играет важную защитную роль на этапе травления, а также обеспечивает требуемую разрешающую способность.

На установке ЦС-5 методом центрифугирования проводилось нанесение фоторезистов при 3 000 об/мин. На первый образец был

нанесен фоторезист S-1813 толщиной 0,8 мкм, на второй образец – та-P1240 толщиной 4 мкм [2, 3].

Этап фотолитографии осуществлялся на установке СТ-301. Экспонирование проводилось в течение 70 с.

Для первого образца операция жидкостного химического травления слоя ИТО осуществлялась в травителе HCl – 72%. Травление проводилось при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5 с. Пленка ИТО второго образца травилась в HCl – 40%. Травление в данном растворе проводилось при $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 15 с.

На рис. 1 представлены топологии полученных структур.

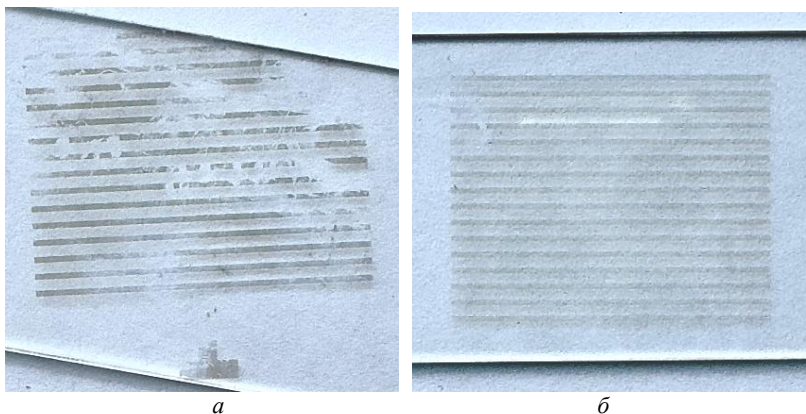


Рис. 1. Полученная топология в слое ИТО для образцов:
а – № 1; б – № 2

Далее была проведена оценка относительной погрешности линейных размеров полученных структур. Несмотря на меньшую толщину фоторезиста S-1813, погрешность размеров оказалась выше, чем погрешность размеров элементов, полученных с применением фоторезиста та-P1240. В первом случае предельная погрешность составила 12%, во втором – 6,4%. Такой результат объясняется малой химической стойкостью ФР-маски на основе фоторезиста S-1813.

Вывод. В результате выполнения работы была разработана технология формирования планарных волноводных структур с применением тонких пленок ИТО. Приведены и описаны параметры основных технологических этапов интегрально-групповой технологии формирования элементов. Было установлено, что при создании волноводных структур рекомендуется использовать жидкий позитивный фоторезист та-P1240, обладающий достаточной химической

стойкостью, а травление пленок ИТО осуществлять в растворе соляной кислоты HCl – 40% при комнатной температуре в течение 15 с.

Используя вышеописанные режимы и рекомендации, возможно получение планарных волноводных структур типа ИТО-на-стекле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Компаниец В.М. Оценка качества очистки поверхности изолирующей подложки от загрязнений // Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения – 2023: матер. XII регион. науч.-прак. конф., Томск, 2023. – Томск: ТУСУР, 2023. – С. 434–436.

2. Позитивные фоторезисты серии S-1800 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lsu.edu/camd/files/Shiple1800Series.pdf>, свободный (дата обращения: 02.03.2025).

3. Позитивные фоторезисты ma-P [Электронный ресурс]: офиц. сайт KTN Royal Institute of Technology. – Режим доступа: <https://www.aphys.kth.se/nanophysics/> (дата обращения: 02.03.2025).

УДК 533.9.07

СИНТЕЗ КАРБИДА ТИТАНА НА ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ УСТАНОВКЕ

Т.С. Шляхов, студент

Научный руководитель Ж.С. Болатова, к.т.н.

Проект № FSWW-2025-0003

г. Томск, НИ ТПУ, tss28@tpu.ru

Карбид титана был получен на трехфазном дуговом реакторе. Для исследования нежелательных примесей проводился рентгенофазовый анализ. Полученный продукт обладает высокой чистотой.

Ключевые слова: карбид титана, трехфазный электродуговой реактор.

На сегодняшний день потребность в материалах, обладающих уникальными физическими свойствами, только растет. В современном мире развитие технологий требует использования высокотехнологичных материалов, способных выдерживать экстремальные условия эксплуатации. Так, карбиды и бориды переходных металлов привлекают внимание благодаря высокой электропроводности, широким диапазонам рН, высокой электро- и теплопроводности [1].

Карбид титана является одним из наиболее востребованных соединений среди таких материалов. Он обладает исключительными свойствами, включая значительную термостойкость, износостойкость и механическую прочность, что делает его незаменимым в таких от-

раслях, как металлургия, инструментальное производство, авиационная и космическая промышленность. Кроме того, благодаря своей высокой твердости и химической инертности карбид титана широко применяется в производстве твердых сплавов и защитных покрытий, способных существенно продлить срок службы конструктивных элементов [2].

При синтезе стоит учитывать качество получаемого продукта, экономичность и эргономичность метода синтеза.

Существует различное множество методов синтеза карбида титана, самые распространенные из них: карботермическое восстановление, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВЭС), механохимический синтез и химическое осаждение из паровой фазы [3]. Однако вышеперечисленные методы обладают рядом существенных недостатков, которые затрудняют их широкое внедрение в промышленность. Эти методы требуют сложных технологических процессов, что влечет за собой дополнительные временные и финансовые затраты. Среди ключевых проблем можно выделить их многостадийность, усложняющую реализацию производства, высокую стоимость используемого оборудования, которое требует постоянного технического обслуживания и значительных энергетических затрат, а также сложность контроля состава конечного продукта, что, в свою очередь, может привести к снижению качества полученного материала.

В то же время широко используется безвакуумный электродуговой синтез. Он обладает рядом достоинств, таких как малостадийность процесса, достижение высоких температур и экономичность. Синтез производится в открытой атмосфере. Во время инициации дугового разряда наблюдается заметный рост концентрации СО и СО₂, что создает эффект экранирования реакционной зоны без риска окисления получаемого продукта. Это позволяет существенно удешевить производство и не использовать вакуумное оборудование и инертные газы [4].

Материалы и методы исследования. В данной работе исходные материалы (порошки титана и углерода) предварительно проходили тщательную подготовку, включающая смешивание в планетарной шаровой мельнице РМ100, представленной на рис. 1. Данный процесс продолжался в течение 30 мин, что обеспечивало равномерное распределение компонентов и повышение их реакционной способности. Далее порошок помещался в графитовый тигель и подвергался дуговому разряду при токе 200 А в течение 120 с.

Синтез карбида титана осуществлялся на специализированной трехфазной электродуговой установке, представленной на рис. 2.



Рис. 1. Внешний вид планетарной шаровой мельницы PM100

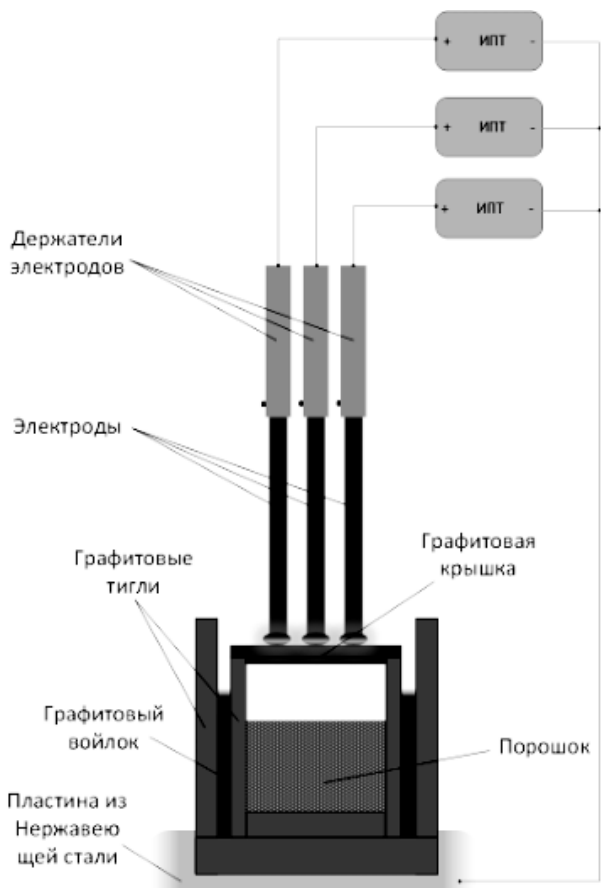


Рис. 2. Принципиальная схема трехфазного дугового реактора постоянного тока

Основным элементом данной установки являются три мощных источника постоянного тока (ИПТ), изготовленных фирмой Elitech, модель АИС 220Д, обладающие высокой стабильностью выходного напряжения и возможностью работы при значительных токовых нагрузках. Каждый ИПТ подключается положительными выводами к электродам, обеспечивающим генерацию дуги, а отрицательные – к массивной пластине из нержавеющей стали. Данная пластина служит в качестве базы для размещения графитовых тиглей, в которых и осуществляется процесс синтеза. Использование графитовых тиглей обусловлено их высокой термостойкостью и химической инертностью, что обеспечивает чистоту конечного продукта и предотвращает нежелательные реакции.

Фазовый состав анализировали методом рентгенофазового анализа (XRD) с использованием рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD 7000 s, $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$, подтверждающим образование фазы TiC.

Результаты. Спектры анализа продемонстрировали минимальное содержание примесных фаз, что говорит о высокой чистоте синтезированного карбида титана. Данный результат подтверждает эффективность использованного метода синтеза и его способность обеспечивать получение материала с высокими эксплуатационными характеристиками.

Заключение. Проведенные эксперименты показывают, что использование трехфазной электродуговой установки позволяет эффективно синтезировать карбид титана в безвакуумных условиях. Метод обладает высокой энергоэффективностью и технологической простотой, что делает его перспективным для промышленного применения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWW-2025-0003)

ЛИТЕРАТУРА

1. Mhadhbi M. Titanium carbide: synthesis, properties and applications / M. Mhadhbi, M. Driss, J. Brill. Eng. // Journal of Brilliant Engineering. – 2021. – Vol. 2. – P. 1–11. DOI:10.36937/ben.2021.002.001.
2. Mao H. et al. Microstructure and mechanical properties of carbide reinforced TiC-based ultra-high temperature ceramics: A Review // Coatings. – 2021. – Vol. 11, No. 12. – P. 1444.
3. Lee G.G. Effect of raw material characteristics on the carbothermal reduction of titanium dioxide / G.G. Lee, B.K. Kim // Materials Transactions. – 2003. – Vol. 44, No. 10. – P. 2145–2150.
4. Исследование режимов работы трехфазного электродугового реактора постоянного тока для синтеза карбида вольфрама / П.В. Поваляев, А.Я. Пак, А.И. Кокорина, А.В. Власов, Ж.С. Болатова // Вестник Башкирского ун-та. – 2023. – Т. 28, № 3. – С. 278–286.

ТОЧНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ФОТОРЕЗИСТИВНЫХ МАСОК НА УСТАНОВКАХ ЭКСПОНИРОВАНИЯ

А.А. Токарева, студентка каф. ФЭ; М.В. Шубин, инж.-технолог

Научный руководитель И.А. Чистоедова, доцент каф. ФЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, nastya.tokareva.04@bk.ru

Представлены результаты исследования точности формирования фоторезистивных масок и на основе статистического анализа предложено решение о применении установок экспонирования в производстве.

Ключевые слова: фоторезистивная маска, толщина, оценка отклонений, среднее квадратичное отклонение.

Фоторезистивная маска является неотъемлемой частью технологического процесса, так как именно с использованием ФР-маски формируют топоологию будущего изделия. В силу того, что предельные отклонения от номинала, которые потребитель готов считать годной продукцией, становятся все меньше, необходимо постоянно обеспечивать модернизацию производства и повышение качества выпускаемой продукции.

Цель работы: оценка точности формирования фоторезистивных масок на автоматических и полуавтоматических установках экспонирования и принятие решения об их применении в производстве на основании проведенного статистического анализа.

В качестве образцов для формирования фоторезистивных масок использовались поликоровые подложки. На очищенную поверхность подложки методом ионно-плазменного распыления наносится адгезионный подслоя хрома, затем проводниковый слой меди.

Нанесение слоя фоторезиста ФП-383 на металлизированную поверхность подложки осуществляется с помощью центрифуги Polos SPIN 150i. Позитивный фоторезист ФП-383 является одним из лучших фоторезистов для процессов жидкостного химического травления, а также обладает хорошей адгезией к металлическим и полупроводниковым поверхностям [1].

Сушка фоторезистивного слоя реализуется в сушильном шкафу BINDER FD 53.

Для проведения операции экспонирования использовались две установки экспонирования: SA-4 и ABM Auto Mask Aligner System.

На каждом режиме экспонирования было сформировано по 12 образцов.

Проявление фоторезиста является обязательной операций в фотолитографии, так как в процессе проявления удаляются лишние участки фоторезиста с поверхности подложки.

Задубливание проводилось в сушильном шкафу BINDER FD 53.

После получения фоторезистивных масок был произведен замер толщины фоторезиста с использованием профилометра SuperView W1 и замер размеров элементов типа проводник и зазор с использованием микроскопа HIROX-5000 для каждого образца с точностью измерения до 1 мкм.

Анализ результатов эксперимента. Для оценки качества сформированного рельефа рисунка использовался метод статистического управления процессами и такой инструмент анализа, как среднее квадратичное отклонение [2].

По результатам измерений толщины фоторезиста и расчету его среднего квадратичного отклонения построен график с указанием верхней и нижней границ допускаемой толщины фоторезиста, представленный на рис. 1.

По полученным данным измерения размеров элементов типа проводник и зазор были рассчитаны модуль отклонения размера элемента в фоторезистивной маске от размера в фотошаблоне и его среднее квадратичное отклонение для каждого режима экспонирования. На основе этих расчетов построены графики, отражающие величину отклонения и ее среднее квадратичное отклонение с указанием границы допустимого отклонения размеров фоторезистивной маски от размеров в фотошаблоне, представленные на рис. 2–4.

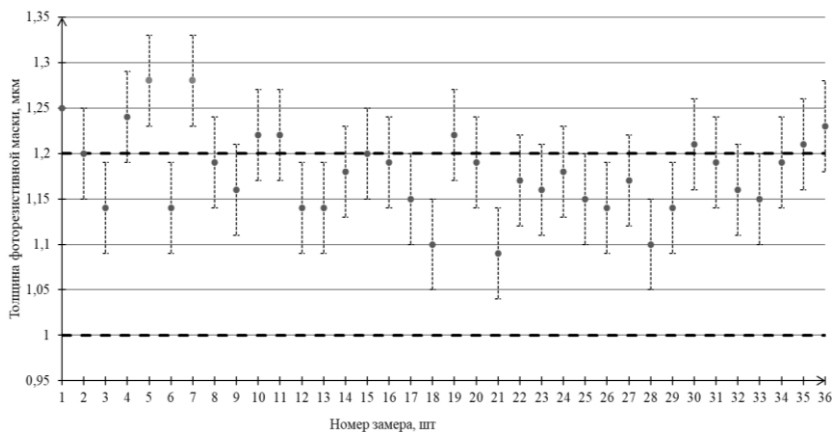


Рис. 1. Оценка отклонений толщины фоторезистивной маски

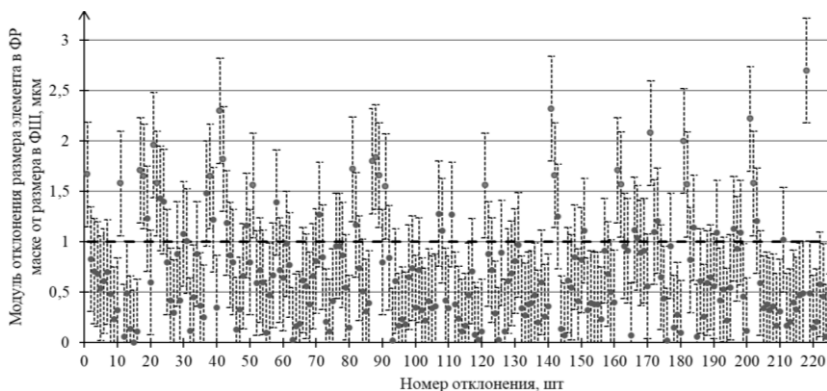


Рис. 2. Оценка отклонений размера элемента в ФР-маске от размера элемента в ФШ, сформированной на SA-4 в ручном режиме

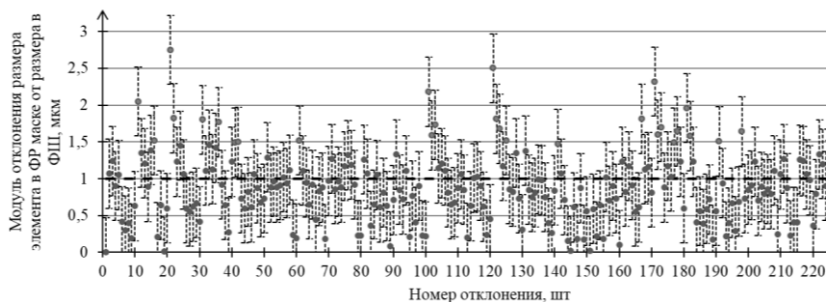


Рис. 3. Оценка отклонений размера элемента в ФР-маске от размера элемента в ФШ, сформированной на ABM Auto Mask Aligner System

Заключение. Согласно проведенному статистическому анализу, для формирования фоторезистивной маски рекомендуется применять установку экспонирования ABM Auto Mask Aligner System, которая обеспечивает минимальный разброс отклонения размеров элементов в фоторезистивной маске от размеров элементов в фотошаблоне, который находится в пределах допуска для изготовления микрополосковых плат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фоторезист ФП-383 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://niopik.ru/products/photoresists/positive/fp-383/>, свободный (дата обращения: 19.03.2025).
2. Уилер Д. Статистическое управление процессами: оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта / Д. Уилер, Д. Чамберс; пер. с англ. – 3-е изд. – М.: Альпина Паблишер, 2023. – 409 с.

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 621.382

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СТАБИЛИЗАТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ НА КЛЮЧАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*В.В. Белоцерковский, М.М. Поддубный, магистранты;
К.А. Ахтырский, аспирант; В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ
Научный руководитель В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, podsubnuy609@gmail.com*

Рассматривается стабилизатор сетевого напряжения, который представляет собой инвертирующий преобразователь на ключах переменного тока. Построена имитационная модель стабилизатора переменного напряжения в среде MatLab.

Ключевые слова: ключ переменного тока, ШИМ-регулирование, стабилизатор переменного напряжения.

Целью данной работы является создание имитационной модели стабилизатора переменного напряжения с ШИМ-регулированием, которая даст возможность исследовать основные режимы работы разомкнутой и замкнутой системы стабилизации. При разработке АС/АС-преобразователей используются различные схемы от тиристорных регуляторов с фазовым управлением, включенных по симисторной схеме [2], до двухмостового преобразователя с развязывающим трансформатором повышенной частоты [1]. У обоих есть свои преимущества и недостатки в виде разного количества компонентов, габаритов преобразователей и сложности управления ключевыми элементами. На рис. 1 приведены виды исполнения ключей переменного тока (КПТ). Существенным недостатком КПТ является повышенное падение напряжения, потому что ток протекает как минимум через два силовых элемента – диод и транзистор, что, в свою очередь, негативно сказывается на КПД и стоимости преобразователя.

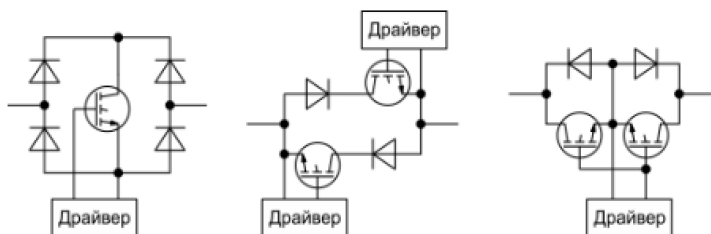


Рис. 1. Виды ключей переменного тока

Была выбрана схема двунаправленного ключа со встречным подключением транзисторов, которые установлены параллельно диодам, позволяющая построить непосредственный преобразователь переменного напряжения инвертирующего типа, который обеспечивает регулирование в диапазоне как ниже входного напряжения, так и выше. Структурная схема этого преобразователя представлена на рис. 2. Чтобы замкнуть отрицательную обратную связь по переменному току, был выбран блок Moving RMS, преобразующий действующее значение переменного напряжения в постоянный сигнал. Для подачи напряжения с выхода преобразователя на блок Moving RMS был поставлен датчик напряжения (ДН). Корректирующим звеном в схеме был выбран ПИД-регулятор, подобранный итерационным методом. Драйвер управляющих импульсов (ДУИ) был собран на генераторе пилообразного напряжения с нарастающей пилой и жесткой логике.

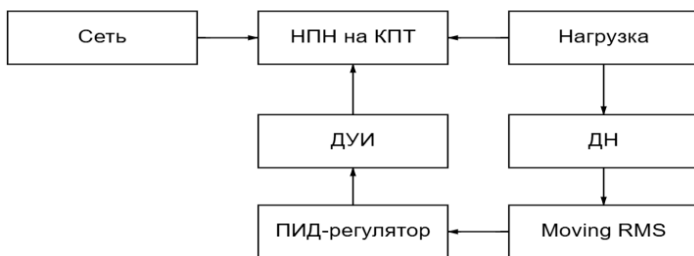


Рис. 2. Структурная схема стабилизатора переменного напряжения на ключах переменного тока

Имитационная модель стабилизатора представлена на рис. 3. Формирование сигнала управления КПТ получается путем использования блока Sawtooth Generator, который формирует уровень пилы от -1 до $+1$. Для того чтобы получить однополярную пилу, с помощью блока Add суммируем сигнал и получаем однополярную пилу амплитудой 2.

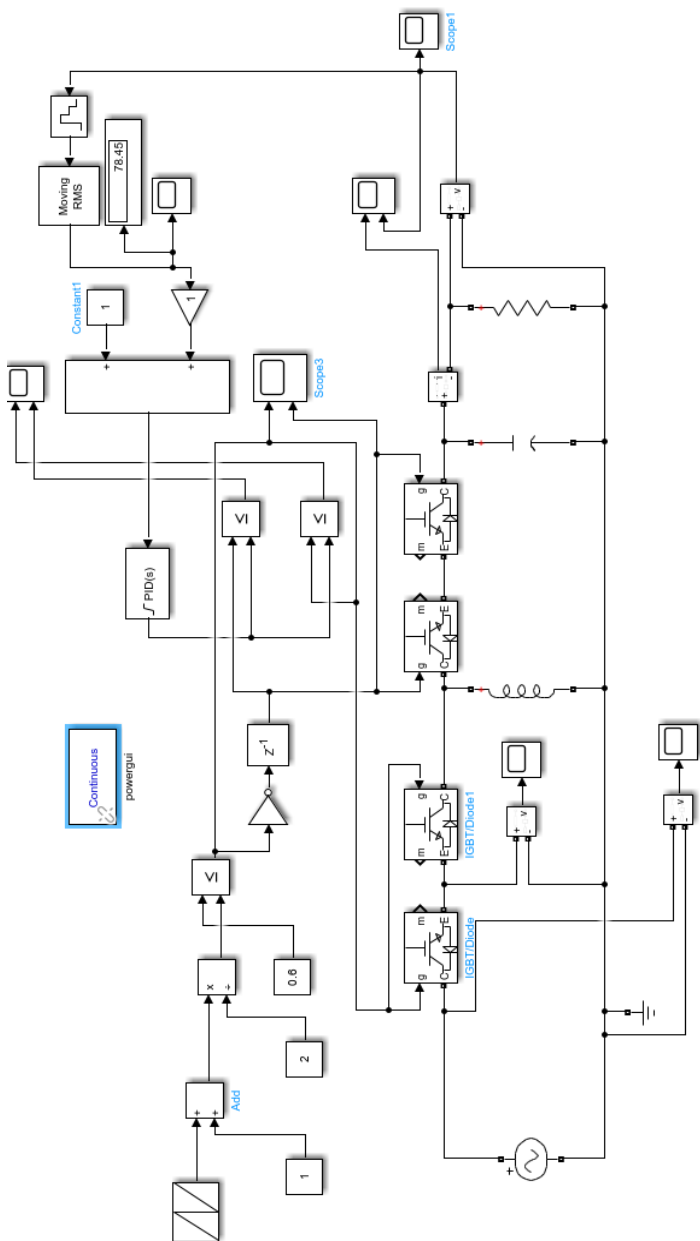


Рис. 3. Имитационная модель стабилизатора

Далее с помощью блока Divide уменьшаем амплитуду пилы до единицы. Сигнал пилы сравнивается с задающим напряжением в виде константы 0,6 в блоке Relational Operator и далее через логический инвертор и модуль Delay, необходимый для введения задержки между управляющими импульсами, подается на затворы КПТ. Для замыкания обратной связи используется сигнал с выхода блока Moving RMS. Принимая во внимание, что блок Moving RMS работает с дискретными данными, перед ним устанавливается блок Zero-order hold, который дискретизирует сигнал датчика напряжения ДН.

На рис. 4 представлены временные диаграммы работы стабилизатора. На первой (верхней) диаграмме показан синусоидальный ток с действующим значением в 4,5 А. На второй диаграмме – переменное напряжение с действующим значением 220 В.

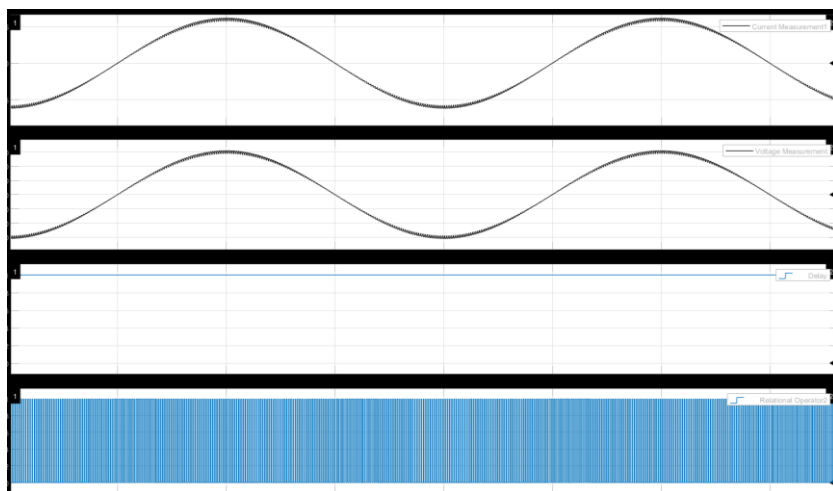


Рис. 4. Диаграммы работы стабилизатора переменного напряжения на ключах переменного тока

ЛИТЕРАТУРА

1. Стабилизаторы переменного напряжения с высокочастотным широтно-импульсным регулированием / А.В. Кобзев, Ю.М. Лебедев, Г.Я. Михайличенко, В.Д. Семенов, И.Б. Сидонский, А.В. Тараскин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
2. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Додэка-XXI, 2005. – 384 с.

**АЛГОРИТМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ
МОДУЛЕЙ СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ
В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

*К.А. Ахтырский, аспирант; В.А. Кабиров, гл. инж. ООО «ВИП
Электроника», к.т.н.; В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, с.н.с., к.т.н.
Научный руководитель В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, с.н.с., к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, k.akhtirsky@gmail.com*

Рассматривается алгоритм, реализующий ротацию модулей стабилизации напряжения в составе системы электропитания космического аппарата между режимами работы и резервирования. Рассмотренный алгоритм позволяет реализовать модульную систему электропитания космического аппарата с заданной глубиной резервирования модулей.

Ключевые слова: модульная система электропитания, модуль стабилизации напряжения, резервирование, логический контроллер.

В работе [1] была предложена структура ЭПК СЭП КА на базе автономных универсальных модулей стабилизации напряжения (МСН). Достоинством предложенной структуры является то, что модули в составе ЭПК являются равноправными и независимыми друг от друга: при выходе из строя любого модуля система сохраняет работоспособность. Это позволяет использовать такую структуру для построения резервированной модульной СЭП КА. Дальнейшее развитие данная структура получила в работах [2, 3], где описываются варианты элемента выбора медианного сигнала, являющегося одним из важных элементов МСН, позволяющих реализовать резервирование модулей в составе СЭП. В работе [4] в структурную схему МСН был введен логический контроллер (ЛК), который предназначен для управления модулем и обеспечения резервирования модулей в составе СЭП. Одной из нерешенных задач, поставленных в указанной работе, является разработка алгоритма ротации модулей в составе СЭП между режимами работы и резервирования для выравнивания их времени наработки с целью продлить ресурс работы всей СЭП. Данная работа посвящена разработке блока логического контроллера, реализующего этот алгоритм.

На рис. 1 представлена предлагаемая структура блока, выполняющего алгоритм ротации модулей в составе СЭП.

На вход данного блока поступают следующие сигналы:

1. N – номер модуля СЭП, в состав которого входит ЛК, содержащий данный блок.

2. DataIn – шина входных данных. В данную шину входят: N (где N – количество модулей) векторов сигналов разрешения работы модулей, генерируемых другими модулями в составе СЭП; N сигналов, содержащих информацию о наработке каждого модуля в составе СЭП.

3. RD – глубина резервирования. Данный сигнал задает количество модулей в составе СЭП, которые должны находиться в режиме резервирования.

4. ECL – длительность цикла работы модулей. Определяет время между ротациями модулей.

На выход блока передается шина, содержащая: вектор сигналов разрешения работы модулей; сигнал, имеющий информацию о времени наработки данного МСН.

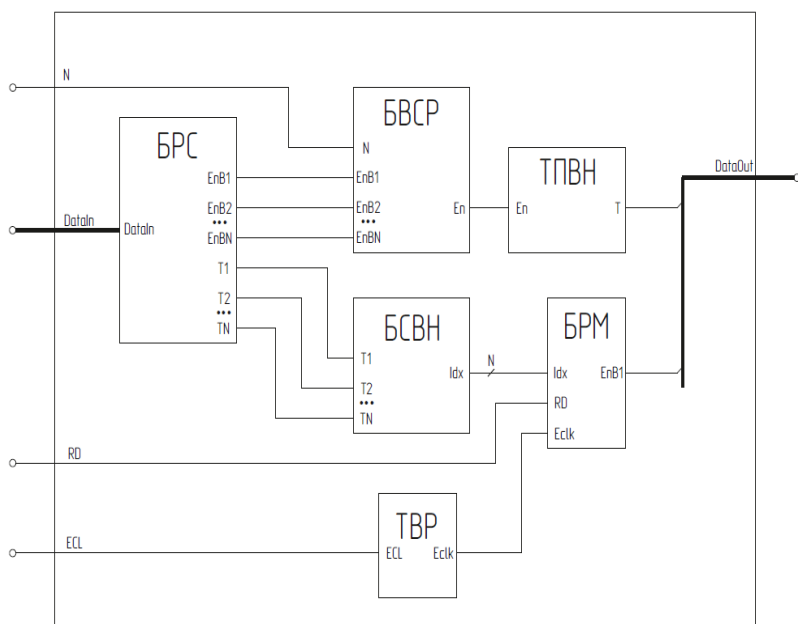


Рис. 1. Структурная схема блока, выполняющего алгоритм ротации модулей в составе СЭП

Структурная схема блока состоит из следующих элементов:

1. БРС – блок разделения сигналов. Данный блок выделяет из входной шины DataIn N сигналов $T1, T2, \dots, TN$, содержащих информацию о времени наработки каждого модуля в составе СЭП, и N шин $EnB1, EnB2, \dots, EnBN$, каждая из которых содержит N сигналов разрешения работы модулей.

2. БВСП – блок выбора сигнала разрешения. Данный блок определяет, разрешена ли работа данного МСН (или запрещена – т.е. он должен быть переведен в режим резервирования) на основе решений, принятых другими модулями и им самим (N входных шин $EnB1, EnB2, \dots, EnBN$, каждая из которых содержит N сигналов разрешения работы модулей): если больше половины модулей принимают решение о том, что данный модуль должен находиться в режиме работы, то на выходе En данного блока формируется логическая единица, иначе – логический ноль. На вход данного блока поступает сигнал N , представляющий собой номер модуля СЭП, в состав которого входит ЛК, содержащий данный блок.

3. ТПВН – таймер подсчета времени наработки. Этот таймер подсчитывает время наработки данного МСН. Подсчет времени наработки производится только тогда, когда МСН находится в режиме работы (на входе En ТПВН логическая единица).

4. БСВН – блок сортировки времен наработки. На вход данного блока поступают сигналы $T1, T2, \dots, TN$, содержащие информацию о времени наработки каждого соответствующего модуля в составе СЭП. Блок сортирует эти времена в порядке возрастания и передает на выход вектор Idx номеров модулей в составе СЭП, в котором номера расположены в том же порядке, в каком были отсортированы времена наработки этих модулей.

5. ТВР – таймер времени ротации. На вход данного блока поступает сигнал ECL , задающий период ротации модулей между режимами работы и резервирования. На выходе таймера формируется тактовый сигнал $Eclk$ с частотой, равной частоте ротации модулей МСН.

6. БРМ – блок ротации модулей. Осуществляет формирование сигналов разрешения работы каждого модуля по следующему алгоритму: исходя из требуемой глубины резервирования (входной сигнал RD), необходимо перевести в режим резервирования RD -модулей МСН. Для перевода в режим резервирования выбираются RD -модулей с наибольшими временами наработки, для чего используется вектор I_{dx} , в котором номера модулей расположены в порядке увеличения времени их наработки. Таким образом, данный блок генерирует на выходе вектор из N сигналов разрешения работы модулей (где логическая единица – модуль должен находиться в режиме работы, а логический ноль – модуль должен находиться в режиме резервирования).

Для реализации алгоритма ротации модулей в составе СЭП между режимами работы и резервирования вышеописанный блок используется в составе логического контроллера каждого МСН, причем логические контроллеры обмениваются между собой информацией о

времени наработки каждого модуля и сигналами разрешения работы модулей, формируемых каждым модулем. Ротация модулей в составе СЭП осуществляется не только с учетом информации о времени наработки каждого модуля, но и с учетом наличия или отсутствия информации, передаваемой i -м модулем. Так, если информация от i -го модуля не поступает на k -й модуль в течение нескольких периодов обмена информацией, это может свидетельствовать о полном или частичном выходе из строя самого i -го модуля, передатчика его интерфейса связи или приемника интерфейса связи k -го модуля. В этом случае логический контроллер k -го модуля принимает решение о том, что работа i -го модуля должна быть запрещена. При этом для обеспечения нагрузки необходимой мощностью в работу вводится один из резервных модулей (при их наличии).

Предложенный алгоритм позволяет реализовать модульную систему электропитания космического аппарата с заданной глубиной резервирования модулей. Демонстрация работы предложенного алгоритма на имитационной модели в среде MatLab Simulink будет представлена в докладе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kabirov V.A. et al. Miniaturization of spacecraft electrical power systems with solar-hydrogen power supply system // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. – Т. 48, No. 24. – Р. 9057–9070.
2. Akhtyrskiy K.A. et al. Solar-hydrogen power supply system and multichannel median signal selector for spacecraft miniaturization // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 95. – Р. 818–831.
3. Многоканальный элемент выбора медианного сигнала / К.А. Ахтырский, В.А. Кабиров, В.Д. Семенов, Д.С. Торгаева // iPolytech Journal. – 2024. – № 28 (4). – С. 504–520. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-504-520>.
4. Система электропитания с изменяемым числом унифицированных модулей / К.А. Ахтырский, В.А. Кабиров, В.Д. Семенов // Сборник избр. статей научной сессии ТУСУР: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2024», г. Томск, 15–17 мая 2024 г.: в 3 т. – Томск: В-Спектр (ИП В.М. Бочкарева); ТУСУР, 2024. – Т. 1. – С. 244–248.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СТАБИЛИЗАТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ С ФАЗОВЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

**В.В. Белоцерковский, М.М. Поддубный, магистранты;
К.А. Ахтырский, аспирант; В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ**
*Научный руководитель В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.
г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, podsubnuu609@gmail.com*

Рассматривается трансформаторный стабилизатор переменного напряжения, во вторичной цепи которого включены два встречных тиристора (вместо симистора). Построена имитационная модель стабилизатора переменного напряжения в среде MatLab/Simulink.

Ключевые слова: фазовое управление, обратная связь по переменному току, стабилизатор напряжения, имитационная модель.

Целью данной работы является создание имитационной модели стабилизатора переменного напряжения с фазовым регулированием, которая позволила бы исследовать реальные режимы работы стабилизатора при разомкнутой и замкнутой цепи обратной связи.

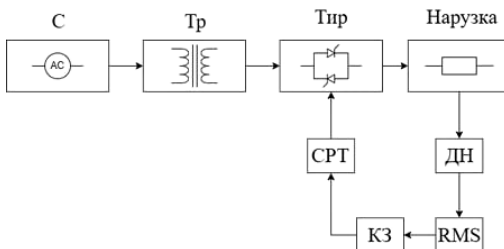


Рис. 1. Структурная схема стабилизатора напряжения

На рис. 1 показана структурная схема стабилизатора переменного напряжения с фазовым регулированием. Сеть переменного напряжения показана в виде блока С. Тр – силовой понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации, равным 4,4, гальванически развязывающий нагрузку от сети, «антипараллельно» включены тиристоры (Тир), регулирующие напряжение на нагрузке (Н). Напряжение нагрузки через датчик напряжения (ДН) поступает на блок (RMS), который из переменного напряжения разной амплитуды формирует среднеквадратичное постоянное напряжение, равное действующему значению. Блок RMS предназначен для корректной работы контура обратной связи. Далее через корректирующее звено (КЗ), сигнал, полученный с ДН, поступает на систему регулирования тиристорами

(СРТ), которая выдает сигнал управления с требуемым фазовым углом.

На рис. 2 изображена имитационная модель стабилизатора напряжения.

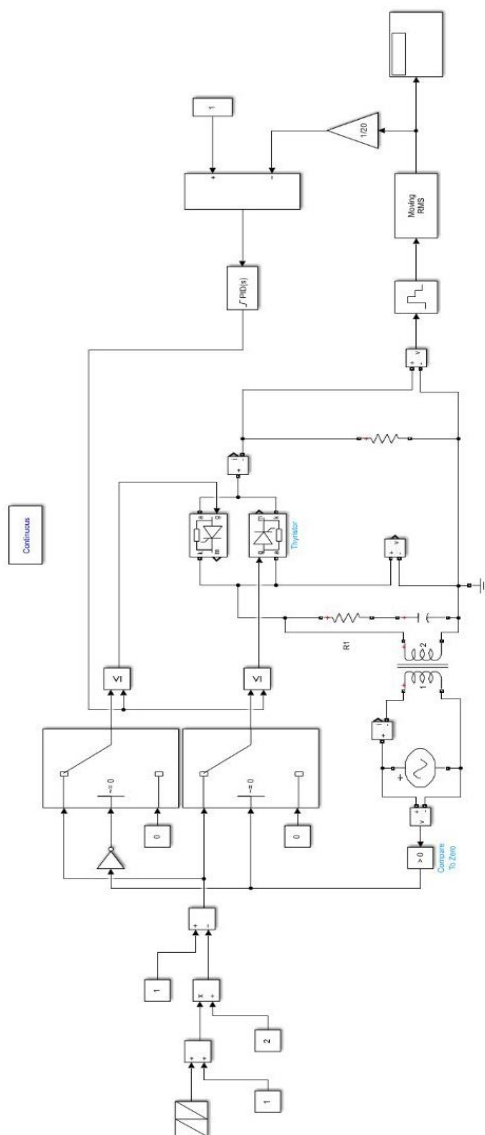


Рис. 2. Иммитационная модель стабилизатора напряжения

Формирование сигнала управления тиристорами получается путем использования блока Sawtooth Generator, который формирует уровень пилообразного сигнала от -1 до $+1$. Для того чтобы получить однополярную пилу, с помощью блока Add суммируем сигнал и получаем однополярную пилу амплитудой 2. Далее при помощи блока Divide получается пилу амплитудой 1, но она является нарастающей, для того чтобы сделать ее убывающей, нужно вычесть 1 с помощью блока Add, таким образом, получается необходимая убывающая пилу. Затем этот сигнал поступает на блок Switch, который работает по принципу переключателя и формирует пилу для каждой полуволны источника переменного напряжения. Затем сигнал сравнивается с установкой в блоке Relational Operator и подается на управляющие выходы тириستоров.

Для замыкания обратной связи по действующему напряжению при изменяющейся форме переменного напряжения, что является следствием фазового регулирования, используется блок Moving RMS, который работает только от дискретных сигналов. Поэтому перед ним устанавливается блок Zero-order hold, который дискретизирует сигнал. На рис. 3 представлены диаграммы напряжений и управляющих импульсов на узлах стабилизатора.

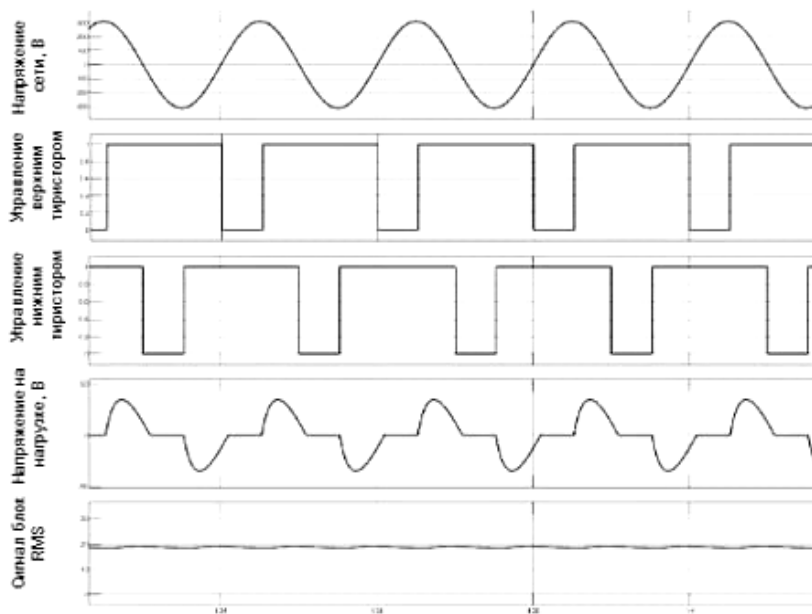


Рис. 3. Диаграммы напряжений стабилизатора напряжения

Представленная имитационная модель стабилизатора переменного напряжения отражает его основные особенности, учитывает реальные параметры силового трансформатора, влияющие на форму тока, позволяет стабилизировать действующее значение переменного напряжения несинусоидальной формы и пригодна для дальнейшего исследования с целью повышения быстродействия контура обратной связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов Б.И., Лебедев Ю.М. Теория автоматического управления: учеб.-метод. пособие. – Томск: ТУСУР, 2010. – 162 с.
2. Мелешин В.И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / В.И. Мелешин, Д.А. Овчинников. – М.: Техносфера, 2011. – 576 с.
3. Томашевский Д.Н. Автономные инверторы: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 120 с.

УДК 621.314.572

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕЗОНАНСНОГО LCL-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

А.Д. Гончаров, М.М. Баёк, аспиранты каф. ПрЭ

*Научный руководитель А.В. Осипов, д.т.н., доцент каф. ПрЭ
г. Томск, ТУСУР, alexey900@gmail.com*

Проведен анализ частотных характеристик LCL-преобразователя при настройке на разные режимы стабилизации выходного тока индуктора.

Ключевые слова: LCL-преобразователь, мягкая коммутация, стабилизация тока.

Увеличение выходного тока индуктора в системах индукционно-го нагрева является одним из ключевых факторов, расширяющих область применения оборудования. Однако в подобных электротехнических комплексах особенно ярко выражена проблема статических потерь выходных узлов. Решением будет резонансный преобразователь, формирующий некоторый коэффициент передачи тока K_I [1–5]. Настройка на некоторую оптимальную частоту $\Omega > 1$ позволит снизить потери в инверторе за счет мягкой коммутации транзисторов.

Целью работы является анализ режимов работы такого преобразователя при настройке на разные частоты в режиме стабилизации выходного тока во всем диапазоне изменения импеданса индуктора, который позволит оценить максимальный ток стабилизации и потери в преобразователе, вызванные смещением угла фазы.

Выбрана область рабочих частот $\Omega > 1$ ввиду невозможности настройки на $\Omega = 1$, что обусловливается характеристиками индуктора [3–5]. Контур можно настроить на два режима работы стабилизации выходного тока (рис. 1):

- в области нулевой фазы $\Omega = 1,1$ – стабилизация тока «нулевой фазы»;
- в области резонансной частоты $\Omega = 1,15$ – стабилизация тока «резонансной частоты».

На рис. 2 и 3 приведены основные характеристики (входной ток I_{in} , ток стабилизации I_b , коэффициент передачи тока K_t , угол фазы φ) при настройке на разные частоты.

Энергетическая эффективность контура определяется величиной фазового сдвига $\cos(\varphi)$. Отношение $\cos(\varphi_1)$ и $\cos(\varphi_2)$ при разных режимах работы контура будет отражать потери в инверторе (таблица). Параметр σR отражает, во сколько раз активная составляющая импеданса индуктора меняется в процессе работы преобразователя.

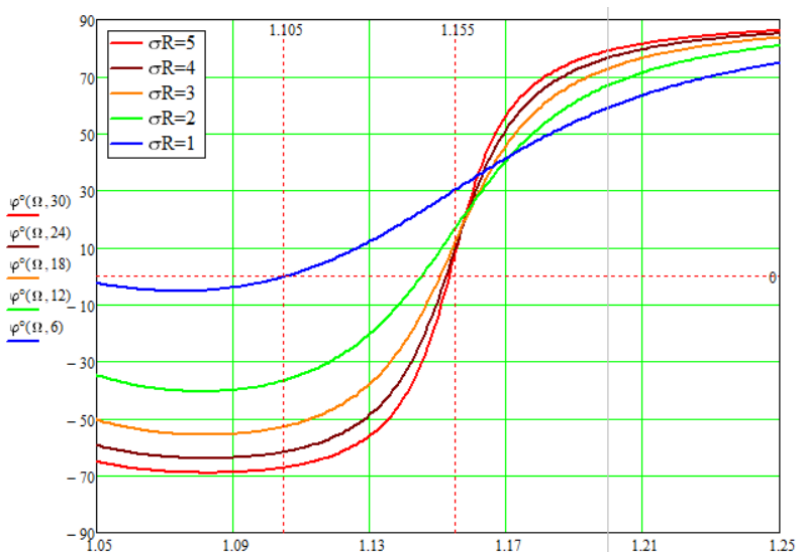
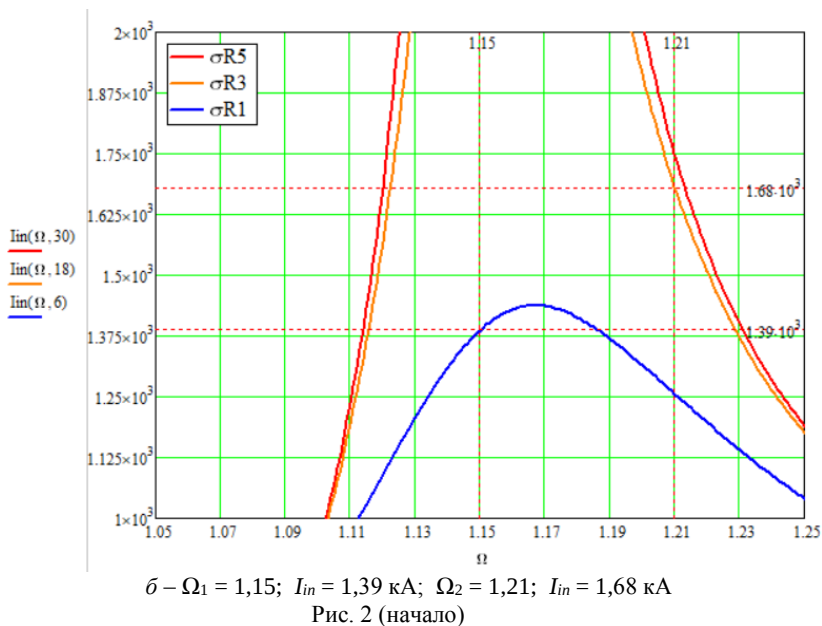
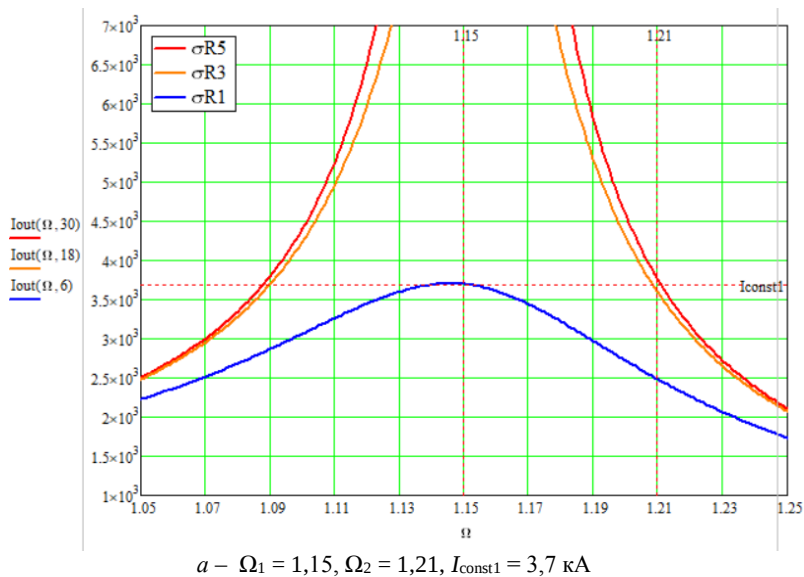
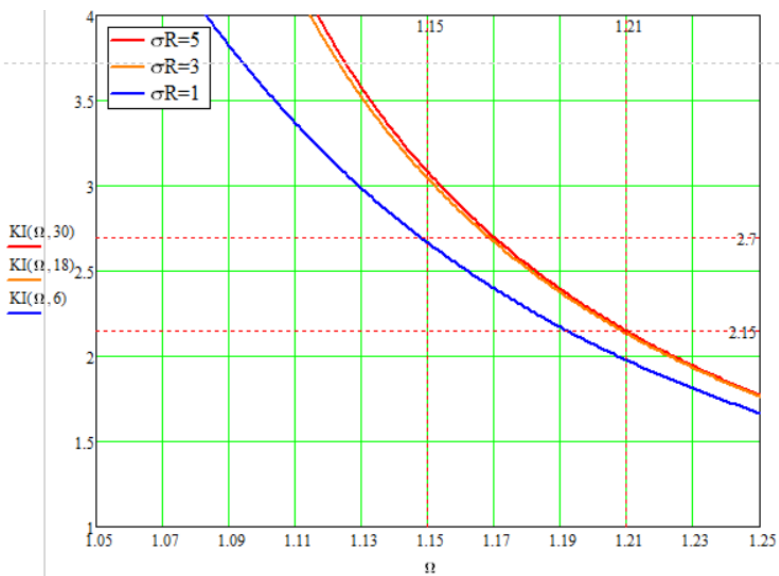


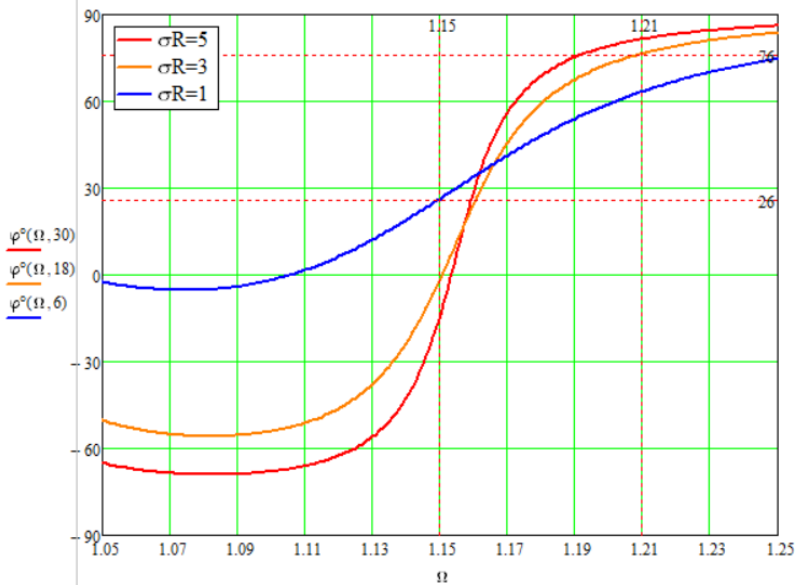
Рис. 1. ФЧХ LCL -контура в режимах стабилизации тока: $\Omega = 1,1$ и $\Omega = 1,15$

Настройка преобразователя на режим работы «резонансной частоты» $\Omega = 1,15$ обеспечивает небольшие, стремящиеся к нулю углы фазы в сравнении с режимом «нулевой фазы» $\Omega = 1$, что дает гораздо меньшие потери (см. таблицу) в преобразователе в полном диапазоне изменения нагрузки, а также наибольший ток стабилизации.



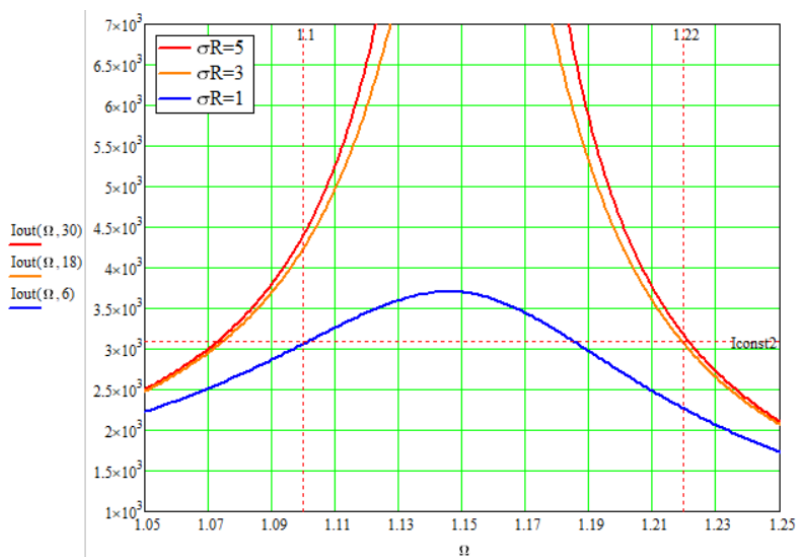


$\epsilon - \Omega_1 = 1,15$; $K_I = 2,7$; $\Omega_1 = 1,15$; $K_I = 2,15$

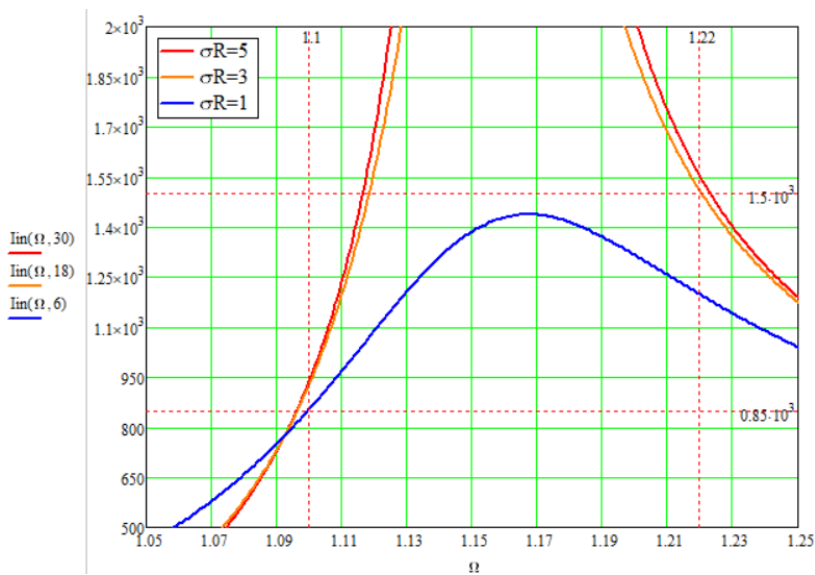


$z - \Omega_1 = 1,15$; $\varphi_1 = 26^\circ$; $\Omega_1 = 1,21$; $\varphi_2 = 76^\circ$

Рис. 2 (окончание). АЧХ выходного тока (а), входного тока (б), коэффициента передачи тока (в), ФЧХ контура (г) на частоте $\Omega = 1,15$



$$a - \Omega_1 = 1,1; \Omega_2 = 1,22; I_{const2} = 3,1 \text{ кА}$$



$$b - \Omega_1 = 1,1; I_m = 0,85 \text{ кА}; \Omega_2 = 1,22; I_m = 1,5 \text{ кА}$$

Рис. 3 (начало)

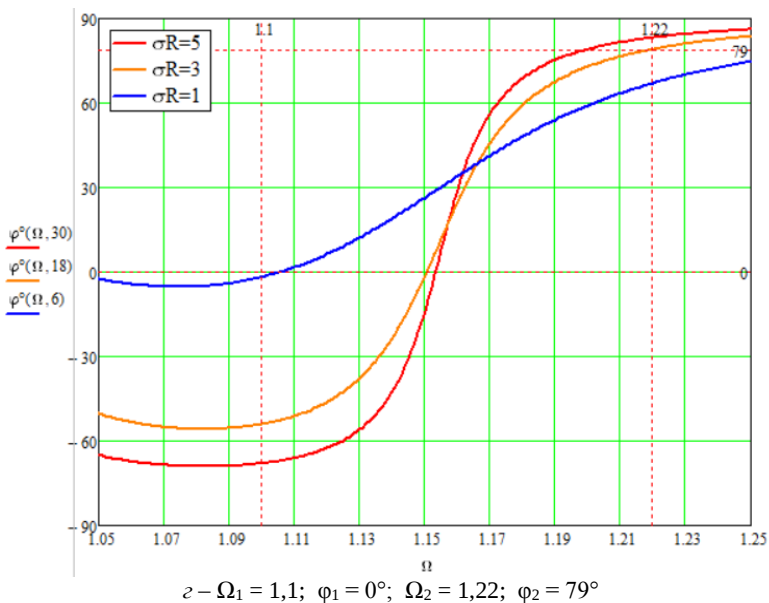
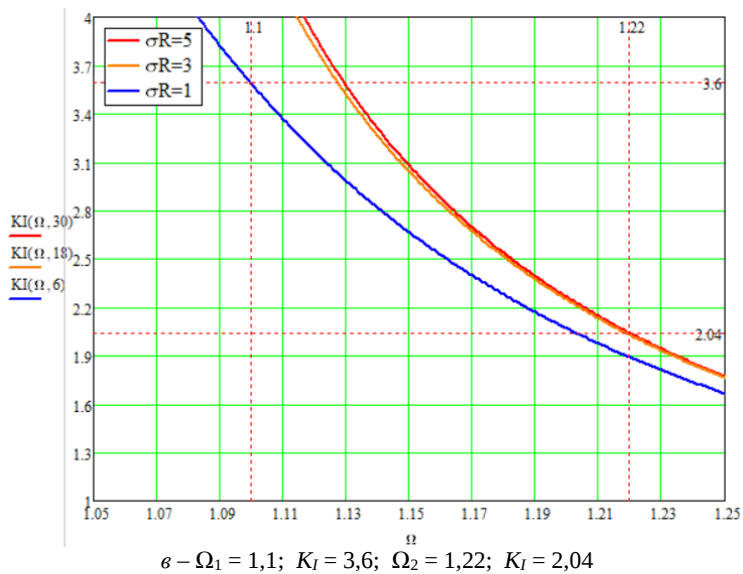


Рис. 3 (окончание). АЧХ выходного тока (а), входного тока (б), коэффициента передачи тока (в), ФЧХ контура (г) на частоте $\Omega = 1,1$

Потери в инверторе в % при разных σR и режимах работы

Режим работы	$\sigma R = 1, \%$	$\sigma R = 3, \%$	$\sigma R = 5, \%$
«Нулевой фазы»	-10,4	70,4	158
«Резонансной частоты»	14,6	25,6	23,4

ЛИТЕРАТУРА

1. Improving the efficiency of IGBT series resonant inverters using pulse density modulation / V. Esteve, E. Sanchis-Kilders, J. Jordan, E. J. Dede, C. Cases, E. Maset, J.B. Ejea, A. Ferreres // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2011. – Vol. 58, No. 3. – P. 979–987.
2. Zgraja J. The influence of high harmonic on calculation accuracy of induction heating system supplied by series inverter // Przegląd Elektrotechniczny. – 2008. – Vol. 84, No. 7. – P. 83–85.
3. Fischer G.L. An Inverter System for Inductive Tube Welding utilizing Resonance Transformation / G.L. Fischer, H. Dort // IEEE IAS. – 1994. – P. 833–840.
4. Mauch K. Transistor Inverters for Medium Power Induction Heating Applications // IEEE IAS. – 1986. – P. 555–562.
5. Resonance Transformation for Induction Heating / G.L. Fischer, H. Dort, H. Knaak, G. Amler, B. Hemmer // PCIM Europe. – March/April 1994. – P. 76–79.
6. Баёк М.М. Резонансный LCL-преобразователь в режиме согласования с индуктором / М.М. Баёк, А.Д. Гончаров, А.В. Осипов // Матер. XV Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления»: в 2 т. – Томск: В-Спектр; ТУСУР, 2023. – Т. 1. – 192 с.

УДК 621.311.69

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО ИНВЕРТОРА С ВЕКТОРНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

К.Ж. Калжанов, аспирант каф. ПрЭ;

В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.

Научный руководитель В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, svd@ie.tusur.ru

Представлены разработка и моделирование векторной системы управления для трехфазного инвертора в среде MatLab/Simulink. Рассмотрены основные принципы векторного управления, позволяющего эффективно регулировать параметры выходного напряжения и тока инвертора. Представлена математическая модель системы, а также описаны этапы построения модели в Simulink, включая реализацию алгоритмов управления и симуляцию работы инвертора.

Ключевые слова: векторное управление, имитационная модель преобразователя, инвертор ведомой сетью.

Трехфазные инверторы играют важную роль в развитии распределенной энергетики и автономного электроснабжения, что требует применения векторного управления, которое обеспечивает возможность синхронизации, высокую точность регулирования и улучшенные динамические характеристики. Целью предлагаемой работы является разработка и анализ имитационной модели трехфазного инвертора напряжения системы электроснабжения газораспределительной станции с каналом генерирования электроэнергии на основе турбодетандера [1].

На рис. 1 представлена общая структура системы электроснабжения на основе трехфазного инвертора с векторным управлением, разработанная на основе блоков, приведенных в [2].

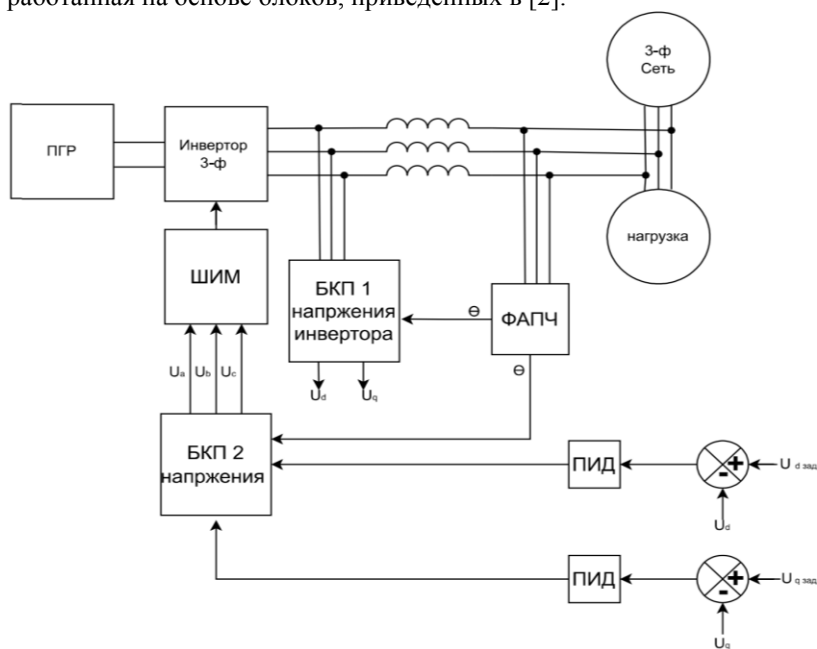


Рис. 1. Структура векторного управления для 3-фазного инвертора ведомой сетью

Предлагаемая система электроснабжения на основе трехфазного инвертора с векторной системой управления и питанием от выпрямителя синхронного генератора турбодетандера может работать как в автономном режиме, так и в режиме синхронной работы с трехфазной сетью, содержит преобразователь для гальванической развязки выпрямителя от сети (ПГР), который обеспечивает необходимые напряжения для питания 3-фазного инвертора; блок координатных преобра-

зований (БКП 1), реализующий прямое преобразование, парк и блок БКП 2, реализующий обратное преобразование. Блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) используется для определения угла положения (Θ) обобщенного вектора ведущей 3-фазной сети. Задания по осям напряжения $U_{d\text{зад}}$ и $U_{q\text{зад}}$ определяют уровень формирования выходного напряжения инвертора.

На рис. 2 показана имитационная модель трехфазного инвертора с векторным управлением, выполненного на основе трех однофазных инверторов, объединенных по схеме «звезда» с организацией нулевой точки для питания однофазных нагрузок системы электроснабжения. Блок преобразователя для гальванической развязки, обозначенный ПГР, для упрощения имитационной модели был заменен идеальным источником постоянного напряжения. Имитационная модель блока ПГР может быть выделена в отдельную подсистему и исследована с целью оптимизации ее технических параметров. Остальные блоки модели разработаны на основе блоков, приведенных в [3]. Для измерения напряжений используется 3-фазный вольтметр.

Для силового преобразователя используется комплексная нагрузка из параллельно соединенных RLC -элементов.

Ниже показана осциллограмма выходного напряжения U_a инвертора (ведомый) и U_a внешней сети (ведущий) в относительных единицах (рис. 3).

Из осциллограммы на рис. 3 видно, что система синхронизируется в течение 0,02 с и выходной сигнал повторяет амплитуду и частоту внешней 3-фазной сети.

Блок вычисления активной и реактивной мощности измеряет выходную мощность на выходе преобразователя (рис. 4).

С учетом задания $U_{q\text{зад}} = 1$ в системе векторного управления активная мощность на выходе преобразователя достигает мощности 15 кВт, $U_{q\text{зад}} = 0$ и реактивная мощность стремится к 0.

Заключение. В данной статье были рассмотрены разработка и моделирование векторной системы управления для трехфазного инвертора в среде MatLab/Simulink. Исследование подтвердило эффективность использования векторного управления для регулирования параметров выходного напряжения и тока инвертора. Предложенная математическая модель и ее реализация в Simulink позволили проанализировать динамические характеристики системы. Результаты моделирования продемонстрировали, что векторное управление обеспечивает высокую точность регулирования. Дальнейшие исследования могут быть направлены на оптимизацию алгоритмов управления, учет нелинейных эффектов и экспериментальную проверку разработанной модели на реальном оборудовании.

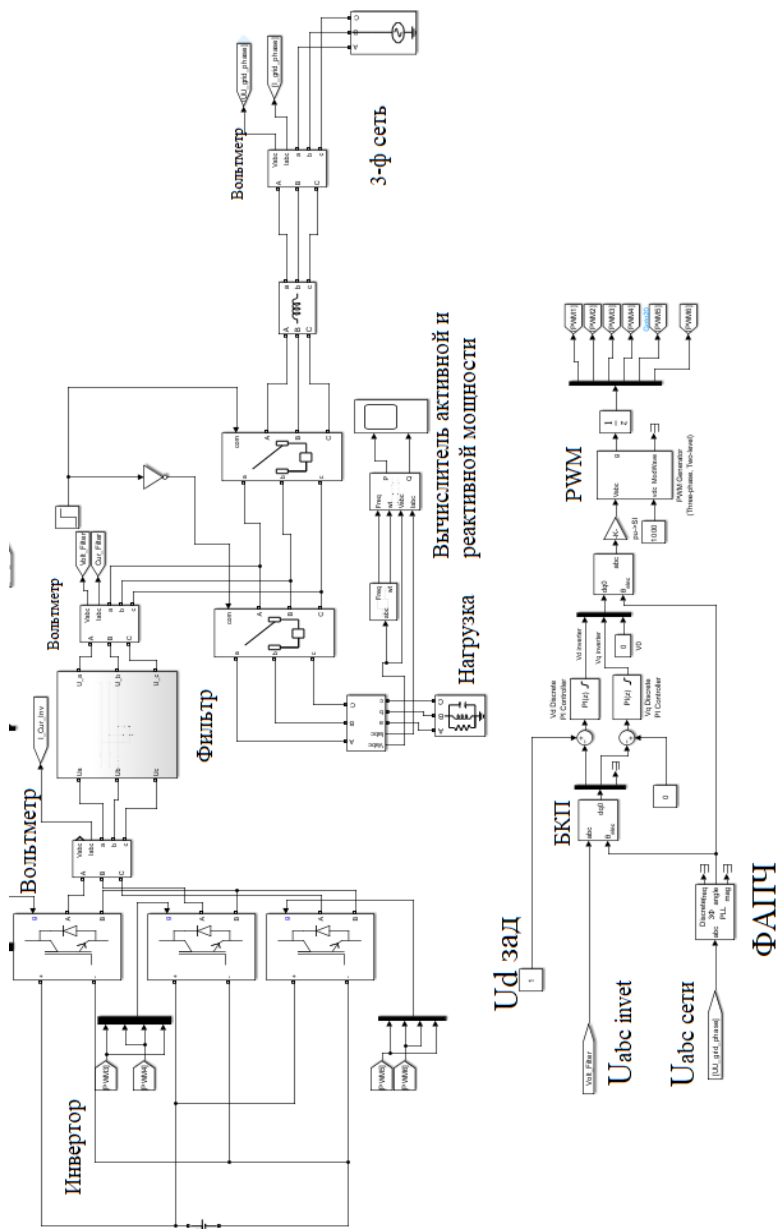


Рис. 2. Имитационная модель трехфазного инвертора с векторным управлением

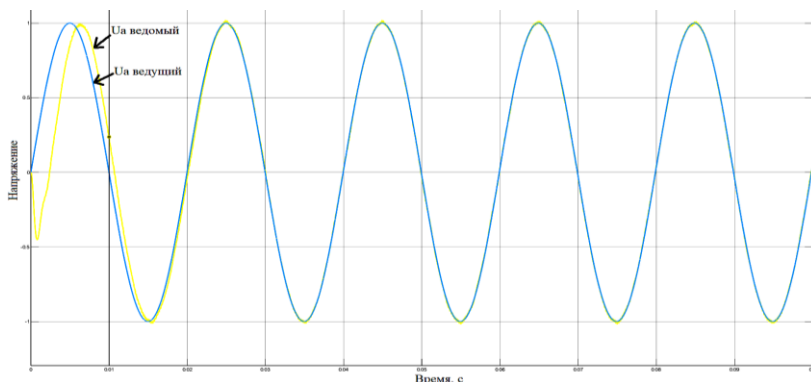


Рис. 3. Осциллограмма выходного напряжения U_a и инвертора (ведомой) и U_{ac} внешней сети (ведущей) в относительных единицах

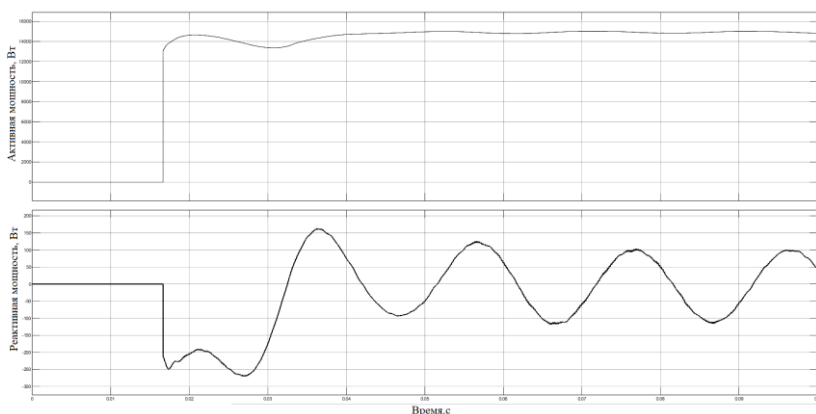


Рис. 4. Выходная активная и реактивная мощность на выходе преобразователя

ЛИТЕРАТУРА

1. Калжанов К.Ж. Имитационная модель преобразователя для системы генерации энергии турбодетандерной установкой / К.Ж. Калжанов, В.В. Белоцерковский, В.Д. Семенов // 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. 177–181.
2. Zekry A.A. Simulation and Implementation of Grid-connected Inverters / A.A. Zekry, A. Abdalrahman // International Journal of Computer Applications (0975–8887). – December 2012. – Vol. 60, No. 4. DOI:10.5120/9683-4117.
3. Дьяконов В.П. MatLab. Полный самоучитель. – М.: ДМК-Пресс, 2012. – 768 с.

ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМ КОРРЕКТОРОМ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

П.А. Стрельников, аспирант; Г.А. Кобзев, доцент каф. ПрЭ, к.т.н.;

В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, PASTr89@gmail.com

Рассмотрена модель векторного управления ККМ, приведены основные соотношения.

Ключевые слова: векторное управление, корректор коэффициента мощности, преобразование Кларк, преобразование Парка.

В последние годы активные корректоры коэффициента мощности (ККМ) стали неотъемлемой частью электроэнергетических систем, особенно в условиях роста потребления электроэнергии и увеличения использования нелинейных и импульсных нагрузок. Основной целью ККМ является улучшение коэффициента мощности (КМ) в системах распределения электроэнергии путем компенсации реактивной мощности и мощности искажений, что, в свою очередь, ведет к снижению потерь в проводах и трансформаторах подстанций, увеличению эффективности энергопередачи и улучшению качества электроэнергии. Векторное управление как метод управления электрическими машинами и статическими преобразователями электроэнергии также находит применение и в ККМ, что позволяет значительно увеличить их динамические характеристики.

Векторное управление представляет собой метод, в соответствии с которым токи и напряжения в трехфазной системе представляются в виде обобщенных пространственных векторов, определяемых соответствующими фазными углами. Контур регулирования при этом реализуется в подвижной системе координат, связанной в электроприводе с вращающимся ротором, а в общем случае – с частотой вращения обобщенного пространственного вектора. Изменение этого вектора по величине во вращающихся координатах эквивалентно его регулированию по постоянному току. Это позволяет упростить систему управления, реализующую регулирующее воздействие, и одновременно с этим обеспечивает повышение динамики системы.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}. \quad (1)$$

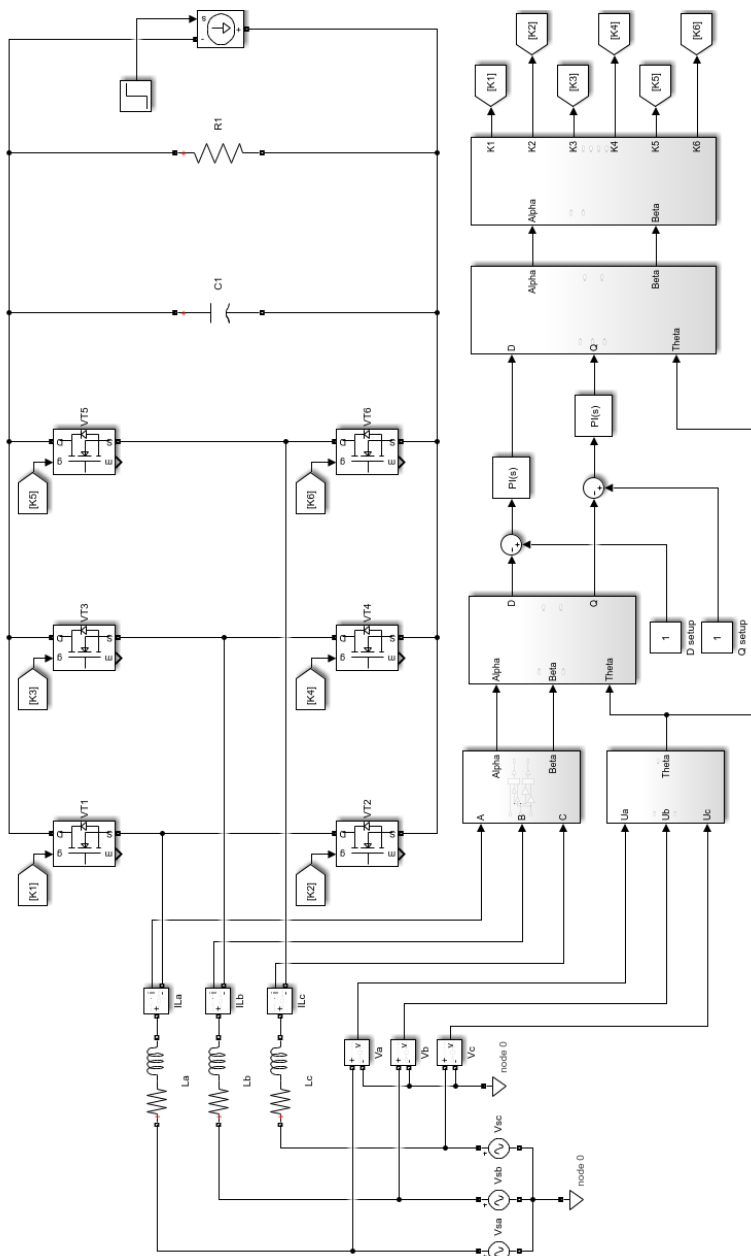


Рис. 1. Имитационная модель ККМ с векторным управлением

Основой векторного управления являются преобразования Кларк и Парка. Суть Кларк–преобразования отражена в уравнении (1). Оно позволяет перевести токи трехфазной системы питающей сети в декартову систему координат $\alpha\beta$.

Преобразование Парка переводит обобщенный вектор тока из системы координат $\alpha\beta$ в систему координат dq , связанную с вращающимся вектором напряжения. Уравнение преобразования Парка (2) математически отражает этот переход через матрицу поворота.

$$\begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Имитационная модель, представленная на рис. 1, показывает, что в декартову систему координат преобразовываются не только токи, но и напряжения питающей сети, которые необходимы для определения угла поворота пространственного вектора напряжения в режиме реального времени.

Такое двойное преобразование позволяет перевести систему в координаты dq , в которых регулятор структурно представляет собой ПИ-регулятор, регулирующий компоненты пространственного вектора в dq -координатах. После этого осуществляется обратное преобразование Парка обобщенного вектора входного тока ККМ из координат dq в координаты $\alpha\beta$, которое можно получить из (2), после чего сигналы управления подаются на модулятор, обеспечивающий формирование сигналов коммутации вентилей.

По сути, векторное управление ККМ представляет собой векторное управление синхронной машиной в генераторном режиме и ее согласование с преобразователем частоты – нагрузкой такого ККМ. Такое управление имеет ряд преимуществ, особенно когда нагрузка динамически изменяется в широком диапазоне, а мощность генератора сопоставима с выходной мощностью преобразователя, как в случае с работой от дизель-генератора в полевых условиях. Отработка резких переходов по нагрузке для дизель-генератора обыкновенно приводит к провалам и всплескам питающего напряжения, изменению частоты питающей сети, что может быть нивелировано подобными решениями.

Заключение. Векторное управление активным ККМ представляет собой современный и эффективный метод управления, позволяющий значительно повысить качество электроэнергии, улучшить энергетическую эффективность и снизить негативное воздействие на сеть. В условиях растущих потребностей в энергии и полупроводниковых преобразователей такие технологии становятся ключевыми для будущего развития электроэнергетических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калачёв Ю.Н. Основы регулируемого электропривода / Ю.Н. Калачёв, Д.В. Самохвалов. – М.: ДМК-Пресс, 2023. – 236 с.
2. Bor-Ren Lin Three-Phase PFC With Space Vector and Hysteresis Control Methods / Lin Bor-Ren, Deng-Ping Wu. – Taiwan: Yunlin, 1997. – 5 p.
3. Dr. John Schönberger Space Vector Control of a Three-Phase Rectifier using PLECS. – Switzerland: Zürich, 2013. – 5 p.

УДК 621.396.69

ПРЕИМУЩЕСТВА МАЛОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ АР-2К И АБ-18

Д.И. Лукьяненко, оператор роты (научной)

*Научный руководитель А.А. Негурица, адъюнкт
научно-исследовательского центра*

*г. Санкт-Петербург, Военная орденов Жукова и Ленина
Краснознаменная академия связи им. Маршала Советского Союза
С.М. Буденного МО РФ, dli99@bk.ru*

Малосерийное производство аккумуляторных батарей АР-2К и АБ-18 обладает рядом значительных преимуществ, особенно в условиях специфических военных и промышленных задач. В статье рассматриваются основные преимущества малосерийного производства, такие как гибкость технологического процесса, оперативная модернизация продукции, возможность быстрой адаптации под требования заказчиков и снижение затрат на разработку. Анализируются перспективы применения этих аккумуляторов в современных условиях, включая их использование в военных операциях.

Ключевые слова: малосерийное производство, аккумуляторные батареи, АР-2К, АБ-18, военные технологии.

Современные аккумуляторные технологии играют ключевую роль в обеспечении автономного питания мобильных устройств, военной техники и роботизированных систем. В условиях специальных военных операций (СВО) особенно важным становится производство высокоэффективных аккумуляторных батарей, таких как АР-2К и АБ-18. Малосерийное производство этих батарей позволяет быстро адаптировать продукцию под текущие нужды, обеспечивая оперативное реагирование на новые вызовы и требования.

Основные тактико-технические характеристики. Аккумуляторная батарея АБ-18 (рис. 1) разработана для использования в радиостанции Р-187-П1 «Азарт» и обладает следующими основными характеристиками:

- ёмкость АБ-18 составляет 18–20 А·ч, что обеспечивает до 10 ч работы устройства в режиме эксплуатации;
- время зарядки занимает 6–9 ч при использовании тока 300 мА;
- разрядный ток дает возможность работы при токе до 3 А, что позволяет удовлетворять повышенные требования по мощности;
- вариативность способов зарядки позволяет батарее заряжаться от PowerBank, стандартного сетевого адаптера (220 В) или специального зарядного устройства, входящего в комплект.

АБ-18 уже успешно используется военнослужащими, находящимися на передовой. Это позволяет определять недочеты, которые проявляются в ходе их эксплуатации. Например, одним из успешных нововведений является индикатор заряда.



Рис.1. АБ-18 при заряде через тестер

По сравнению с АБ-18 аккумуляторы АР-2К (рис. 2) являются новичками и еще не успели до конца пройти апробации в зоне специальной военной операции. Однако это не уменьшает их ценности и необходимости.

АР-2К применяются в радиостанциях с аналогичным названием. В основном они используются отрядами особого назначения, поэтому их характеристики носят информативный характер.

Собранные аккумуляторные батареи держат заряд в полтора раза больше штатной версии, а также обладают исключительной возможностью зарядки от Туре-С. Обладая двумя этими преимуществами, АР-2К постепенно находит свое применение на военном поприще.



Рис. 2. AP-2K при заряде через тестер

Преимущества малосерийного производства. Малосерийное производство аккумуляторных батарей AP-2K и AB-18 имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с массовым выпуском:

- в первую очередь, повышенное качество сборки и контроля, поскольку при небольших объемах выпуска каждая батарея проходит тщательную проверку, что позволяет минимизировать производственные дефекты и обеспечить стабильность эксплуатационных характеристик [1];

- также можно выделить адаптивность к специфическим требованиям, т.е. возможность оперативного внесения изменений в конструкцию позволяет производителям быстро адаптировать продукцию под особенности конкретных систем связи и условий эксплуатации [2, 3];

- малосерийное производство дает возможность тестировать и внедрять новые технологии и материалы, что приводит к повышению общей надежности и безопасности батарей;

- самым главным можно выделить компактность и удобство эксплуатации, потому что небольшие габариты и сниженный вес способствуют легкости транспортировки и установке оборудования даже в труднодоступных местах.

Заключение. Малосерийное производство аккумуляторных батарей моделей AP-2K и AB-18 позволяет добиться высоких эксплуатационных характеристик за счет строгого контроля качества, гибкости в модернизации конструкции и оперативного внедрения инновацион-

ных решений. Данные преимущества обеспечивают надежное энерго-снабжение специализированной аппаратуры и средств связи в условиях экстремальной эксплуатации, что делает данные модели востребованными в современном техническом мире.

ЛИТЕРАТУРА

1. Князев С.В. и др. Мелкосерийное производство литых пористых и композиционных материалов // *Металлургия: технологии, инновации, качество*. – 2019. – С. 152–158.
2. Атаев Б. Типы производства и организация производственного процесса / Б. Атаев, А. Ягшыев, М. Аралиев // *Наука и мировоззрение*. – 2024. – Т. 1, № 23. – С. 156–159.
3. Саидова О. Аддитивные технологии и литейное производство / О. Саидова, Х. Шодмонов // О ‘zbekistonda to ‘qimachilik sanoati muammolariining tahlili va yechimlari» mavzusidagi. – 2021. – 98 с.

УДК 621.314.1

СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ EGAN-ТРАНЗИСТОРОВ

*Е.Ю. Пономарев, Н.Н. Рагимов, магистранты ПИШ;
С.М. Мартемьянов, доцент ОЭИ ИШНКБ НИ ТПУ, к.т.н.
Научный руководитель И.В. Кулинич, доцент ПИШ, к.т.н.
Проект ПИШ. Вторичный источник питания для аппаратов
околоземных орбит
г. Томск, ТУСУР, neutronstar437@yandex.ru*

Рассмотрены особенности управления eGaN-транзисторами и трудности их применения в импульсных преобразователях. Исследован метод адаптации контроллеров, предназначенных для MOSFET-транзисторов, с целью эффективного управления eGaN-транзисторами.

Ключевые слова: eGaN-транзисторы, импульсные преобразователи, драйвер затвора, синхронный понижающий преобразователь.

Современные импульсные преобразователи напряжения строятся с использованием специализированных микросхем – контроллеров. Подобные микросхемы широко доступны, а также удобны в использовании благодаря заложенному функционалу и встроенным системам защиты.

Большинство контроллеров предназначено для управления кремниевыми MOSFET и не подходит для управления eGaN-транзисторами из-за разницы в допустимом напряжении затвора. Для eGaN-

транзисторов оно обычно не превышает 6 В, тогда как MOSFET требует напряжение 10 В и выше, что неизбежно приведет к пробоем eGaN-транзистора [1]. Исключения составляют контроллеры, предназначенные для логических MOSFET, формирующие управляющие импульсы амплитудой около 5 В.

При этом для управления eGaN-транзисторами выбрать контроллер с подходящей амплитудой управляющих импульсов недостаточно. Эффективность eGaN-транзисторов во многом обусловлена их быстродействием – высокая скорость переключения позволяет снизить динамические потери. Поскольку eGaN-транзисторы могут переключаться очень быстро, драйвер затвора должен выдерживать более высокие значения dv/dt (рекомендуемое значение – 100 В/нс и выше) [2]. Такие высокие скорости переключения обусловлены тем, что eGaN-транзисторы обладают меньшей величиной заряда затвора по сравнению с кремниевыми MOSFET-транзисторами.

Существуют специализированные контроллеры для eGaN-транзисторов. Однако подобные решения немногочисленны и зачастую труднодоступны. Отсюда возникает необходимость в другом, более доступном способе реализации эффективной схемы управления.

Предлагаемое решение позволяет адаптировать контроллеры, разработанные для кремниевых MOSFET-транзисторов, для эффективного управления eGaN-транзисторами. Суть данного способа заключается в применении внешнего драйвера затвора для eGaN-транзисторов. На рис. 1 представлен пример реализации понижающего преобразователя с синхронным выпрямителем.

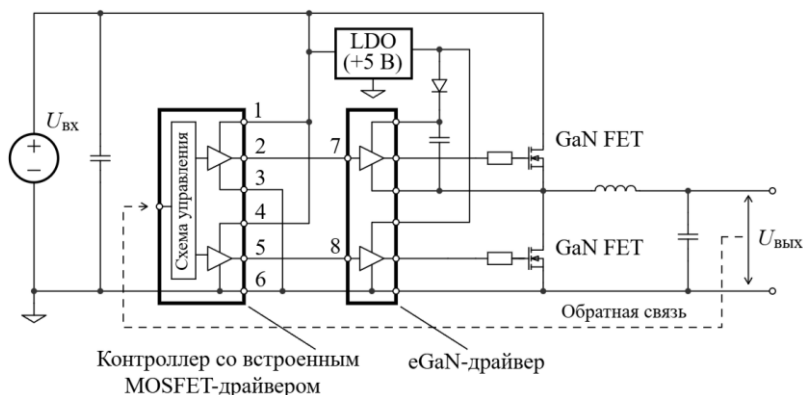


Рис. 1. Понижающий преобразователь с синхронным выпрямителем

Оба встроенных в контроллер MOSFET-драйвера включены как драйверы нижнего ключа, а их выходы соединены со входами внеш-

него драйвера. При таком включении встроенный MOSFET-драйвер затвора остается фактически не задействованным – его работу выполняет внешний eGaN-драйвер.

Для оценки рассматриваемого подхода собран макет преобразователя. Схема управления построена на основе контроллера синхронного понижающего преобразователя LTC3891. В качестве ключевых элементов используются транзисторы EPC2059. Управление затворами силовых транзисторов реализовано с использованием внешнего eGaN-драйвера затвора LMG1210.

Измерительный стенд включает электронную нагрузку и два лабораторных блока питания. Проверка параметров макета осуществлялась при входном напряжении 30 В и выходном напряжении 12 В. Первый блок питания используется для питания силовой части схемы, второй – для питания схемы управления.

В таблице представлены снятые экспериментальные данные и результаты расчета КПД.

Экспериментальные данные

Ток нагрузки, А	Вх. мощность, Вт	Вых. мощность, Вт	КПД, %
0,1	1,471	1,18	80,22
0,2	2,671	2,36	88,36
0,3	3,872	3,56	91,94
0,4	5,103	4,76	93,28
0,5	6,303	5,96	94,56
0,6	7,503	7,15	95,30
0,7	8,704	8,34	95,82
0,8	9,935	9,55	96,12
0,9	11,135	10,74	96,45
1	12,366	11,93	96,47

На рис. 2 представлена зависимость КПД преобразователя от тока нагрузки.

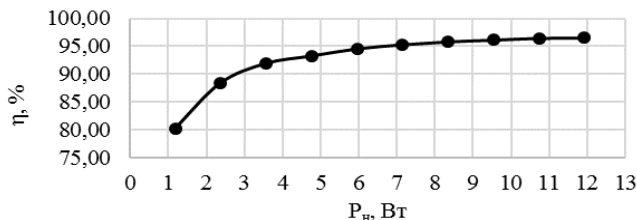


Рис. 2. Зависимость КПД преобразователя от тока нагрузки

С увеличением тока нагрузки наблюдается плавный рост КПД преобразователя. При токе 1 А КПД преобразователя достигает

96,47%, что подтверждает эффективность предложенного подхода и возможность применения его построения более мощных преобразователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Advantages of Using Gallium Nitride FETs in Satellite Applications // Сайт компании «Renesas Electronics». – URL: <https://www.renesas.com/en/document/whp/advantages-using-gallium-nitridefets-satellite-applications>
2. GaN First Time Right™ Design Process // Сайт компании «Efficient Power Conversion Corporation». – URL: <https://epc-co.com/epc/design-support/gan-first-time-right/drivers-and-controllers#half-bridge-drivers>

УДК 621.38

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПОНИЖАЮЩЕГО DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МОДУЛЬНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ МОСТОВОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ В СРЕДЕ MATLAB

К.А. Редлих, аспирант каф. ПрЭ;

В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.

г. Томск, ТУСУР, redlih25kirill@yandex.ru

Рассмотрены вопросы построения и исследования имитационной модели понижающего преобразователя модульного типа в среде MatLab/Simulink. Каждый из модулей содержит транзисторный инвертор напряжения со схемой управления, трансформатор и выпрямитель.

Ключевые слова: преобразователь модульного типа, мостовой инвертор напряжения, имитационная модель, MatLab, Simulink, корректирующее звено, замкнутая САР.

Современные тенденции развития силовой электроники акцентируют внимание на высокомоощных источниках вторичного электропитания, которые должны обладать высоким уровнем эффективности и надежности. Модульные преобразователи напряжения представляют собой одно из перспективных решений для достижения этих целей, поскольку они позволяют суммировать на нагрузке мощность отдельных модулей и повысить надежность преобразователя [1]. Одним из главных недостатков модульных преобразователей является неравномерное деление тока между силовыми модулями. Это может привести к перегрузке отдельных модулей и их перегреву. Поэтому постановка и решение задачи равномерного деления тока без ухудшения энергоэффективности, являются актуальными.

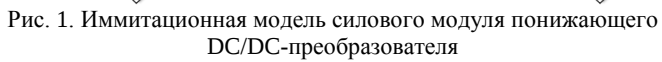
Поставленная задача может быть решена путем организации двухконтурной системы автоматизированного регулирования (САР). Внутренний (подчиненный) контур стабилизации тока такой САР обеспечивает равномерное деление тока между модулями и защиту от перегрузки, а внешний контур, контур стабилизации напряжения, обеспечит точность стабилизации выходного напряжения и динамику переходных процессов при воздействии дестабилизирующих факторов [2].

Понижающий преобразователь напряжения реализован по двухконтурной системе подчиненного регулирования. Каждый из модулей выполнен со звеном повышенной частоты, состоящим из мостового инвертора напряжения с фазовым управлением второй стойки инвертора относительно первой, высокочастотного трансформатора и мостового выпрямителя с LC -фильтром. В цепи дросселя фильтра установлен датчик тока, необходимый для организации обратной связи по току, а система управления силовым модулем (система управления подчиненным контуром), содержащая распределитель импульсов, широтно-импульсный модулятор, корректирующее звено по току и сравнивающее устройство для определения ошибки управления по выходному току модуля, обеспечивает стабилизацию этого тока и его ограничение при необходимости.

Система управления внешним контуром содержит сравнивающее устройство для определения ошибки управления по выходному напряжению, на один вход которого подается задающий сигнал по напряжению от прецизионного источника напряжения, а на его второй (вычитающий) вход подается сигнал обратной связи от датчика выходного напряжения, и корректирующее звено по напряжению, обеспечивающее заданную точность стабилизации выходного напряжения и необходимые динамические характеристики [3].

Сигнал ошибки внешнего контура регулирования по выходному напряжению, обработанный корректирующим звеном по напряжению, является задающим сигналом для всех систем управления силовыми модулями и подается одновременно на все четыре сравнивающие устройства для определения ошибки управления по выходному току модуля. Система управления силовым модулем позволяет управлять модулями одновременно, обеспечивая равные токи всех модулей и поочередную работу модулей по мере нарастания мощности нагрузки.

Структура силового модуля, понижающего DC/DC-преобразователя, и его имитационная модель представлены на рис. 1, 2 соответственно.



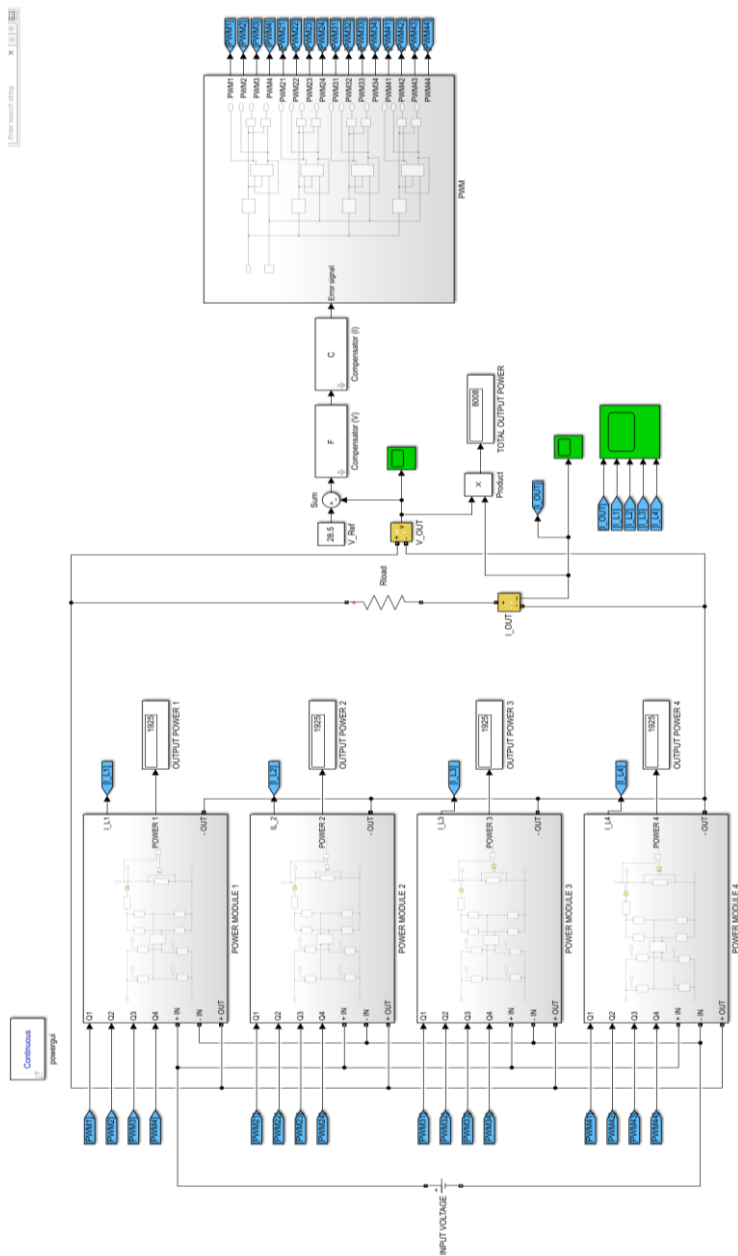


Рис. 2. Имитационная модель преобразователя модульного типа

Система управления (рис. 3) представляет собой генератор ШИМ-сигнала первого рода с формирователем фазового сдвига между сигналами управления силовыми ключами. Это достигается с помощью применения D-триггеров (D-Flip-Flop) и логических элементов «Исключающее ИЛИ» (XOR).

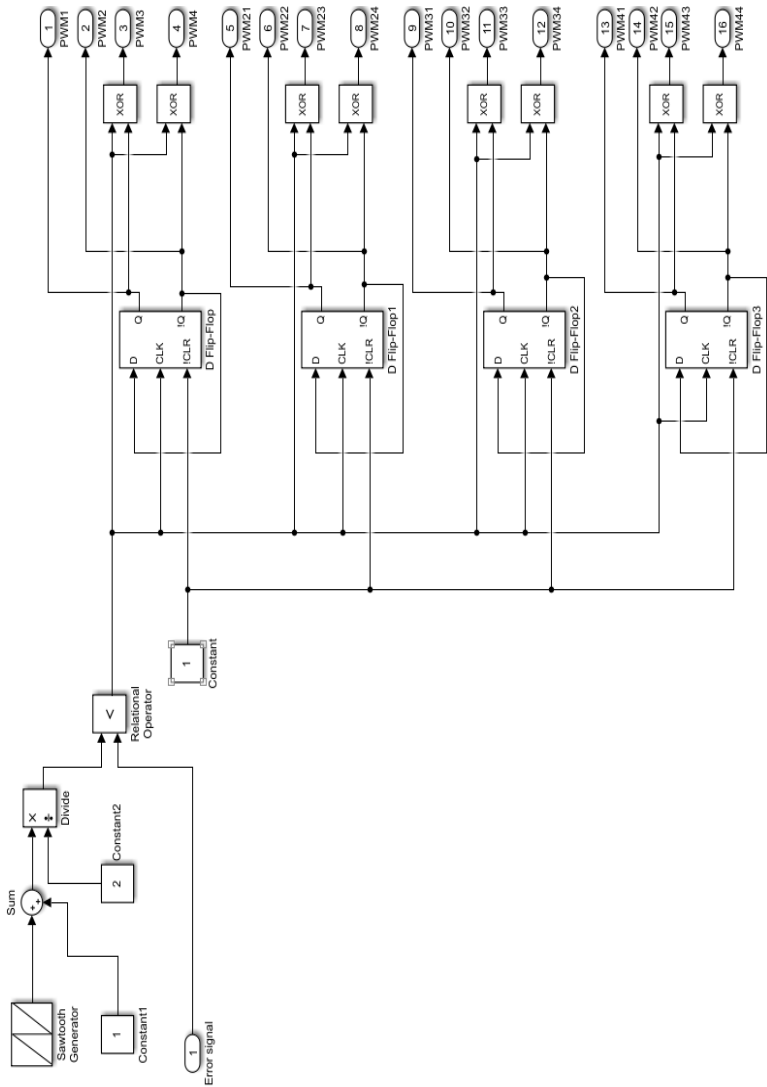


Рис. 3. Структура системы управления преобразователем модульного типа

Из рис. 4 видно, что модульный преобразователь обеспечивает заданный уровень выходного напряжения в +28,5 В, выходной ток пропорционально распределяется между всеми силовыми модулями, и суммарная мощность составляет 8 кВт.

Для оценки работы корректирующего устройства при динамически изменяющемся сопротивлении нагрузки изменим сопротивление нагрузки, увеличив его в 2 раза после выхода на установившийся режим в момент времени равный 350 мс. Временная диаграмма выходного напряжения при динамическом изменении сопротивления нагрузки представлена на рис. 5.

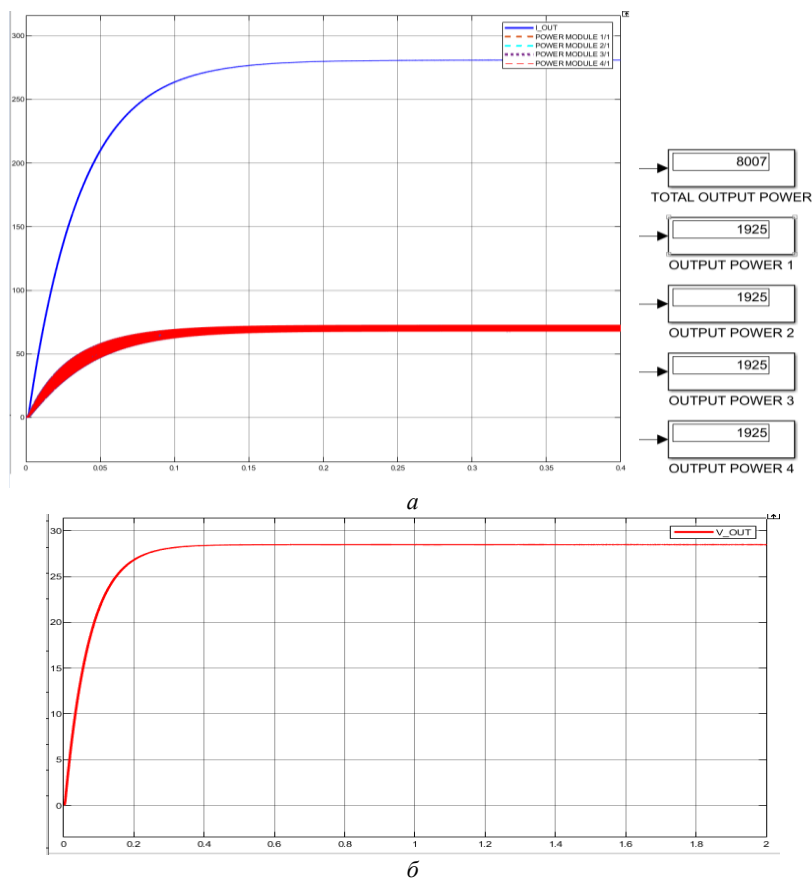


Рис. 4. Временная диаграмма суммарного выходного тока и токи силовых модулей преобразователя модульного типа (а), временная диаграмма выходного напряжения (б)

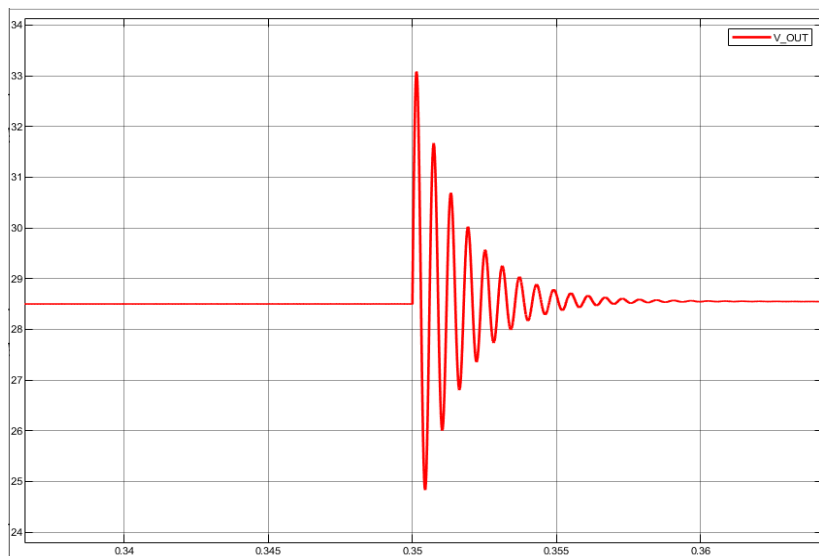


Рис. 5. Временная диаграмма выходного напряжения при динамическом изменении сопротивления нагрузки

Амплитуда выходного напряжения увеличивается на 4,5 В и достигает значения в 33 В, длительность переходного процесса составляет 10 мс, после чего выходное напряжение колебательно выходит на заданный уровень. Характер переходного процесса свидетельствует о необходимости оптимизации корректирующего звена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фазел С. Многоуровневые преобразователи: схемы, особенности управления. – Ч. 1 // Силовая электроника. – 2019. – № 1.
2. Кучак С.В. Система электроснабжения на базе электрогенераторной установки и литий-ионного накопителя с улучшенными динамическими характеристиками: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, НГТУ, 2020. – 138 с.
3. Синтез цифровых корректирующих звеньев для корректора коэффициента мощности на основе повышающего преобразователя в программе MatLab / И.Е. Гедзенко, В.Д. Семёнов, Д.Б. Бородин, В.А. Кабиров // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 19–21 мая 2021 г. – Томск: В-Спектр, 2021. – Ч. 1.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКИ ETHERNET В КАЧЕСТВЕ ДРАЙВЕРНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ ПИТАНИЯ

*Г.Ф. Сергеев, студент каф. промышленной электроники
Научный руководитель Д.А. Серёгин, доцент каф. промышленной
электроники, к.т.н.
г. Москва, ФБГОУ ВО «НИУ «МЭИ», SergeichevGF@mpei.ru*

Представлен анализ возможности применения трансформаторов гальванической развязки интерфейса Ethernet в качестве драйверных трансформаторов в импульсных источниках питания. Результаты приведенного исследования показали перспективность подобного применения с использованием дополнительной обвязки.

Ключевые слова: драйверные трансформаторы, затворные трансформаторы, трансформаторы гальванической развязки Ethernet, импульсные источники питания, источники вторичного электропитания.

При проектировании сетевых источников питания средней и высокой мощности часто применяются такие двухтактные топологии, как полумостовая и мостовая, а также их модификации (резонансные и т.д.). С точки зрения управления данными преобразователями существует особенность наличия в них «верхнего» ключа, т.е. полупроводникового ключа, потенциал затвора которого поднят относительно нулевого на величину, равную половине напряжения питания. Это обуславливает необходимость подавать на затвор данных ключей относительно высокое напряжение сравнительно с напряжением питания системы управления преобразователей. Данная проблема обычно решается одним из двух вариантов: использованием так называемых затворных трансформаторов (рис. 1, а) или бутстрепных драйверов (рис. 1, б). Помимо описанных выше применений, затворные трансформаторы также могут применяться в случае использования контроллера на вторичной стороне или при реализации синхронного выпрямителя. На сегодняшний день отсутствуют серийно выпускаемые отечественные микросхемы бутстрепных драйверов и затворные трансформаторы с приемкой «ВП», а использование специализированно намотанных драйверных трансформаторов значительно увеличивает себестоимость конечного изделия.

Тем не менее на сегодняшний день в России серийно выпускаются трансформаторы гальванической развязки Ethernet 10/100BASE-TX с категорией качества «ВП» и «ОТК». Данные трансформаторы имеют

достаточное напряжение изоляции для их применения в том числе в сетевых источниках питания, а также малые габаритные размеры. Использование данных трансформаторов в комбинации с дополнительной обвязкой может являться перспективным вариантом для организации цепи управления, вследствие низкой себестоимости готовыхмоточных изделий в сравнении с изготавливаемыми на предприятии локально, а также низкой себестоимостью выполнения монтажа SMD-компонентов.

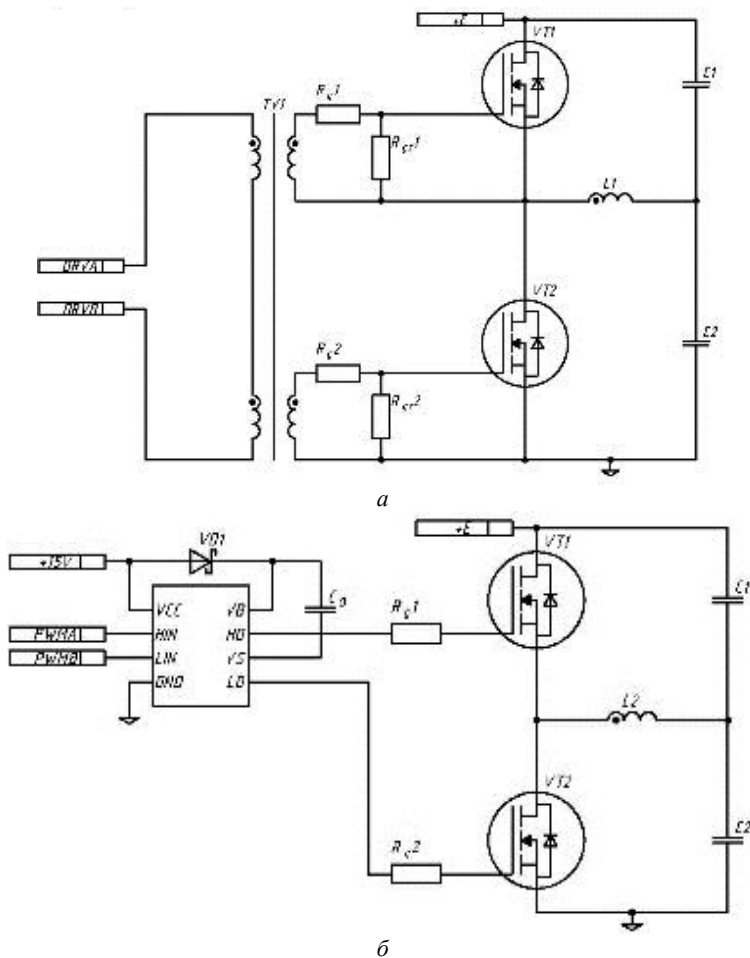


Рис. 1. Типовая реализация бутстрепного драйвера и затворного трансформатора

Использовать данные трансформаторы непосредственно в качестве затворных трансформаторов не представляется возможным вследствие достаточно низкой индукции и тока насыщения: трансформатор насыщается даже при подаче относительно малых по амплитуде однополярных импульсов, что видно по наблюдаемой форме сигнала на рис. 2, *а*. Данные трансформаторы рассчитаны на работу при токах порядка 10–50 мА, что исключает возможность передачи значительного тока, необходимого для обеспечения хорошей динамики переключения, даже импульсами малой продолжительности.

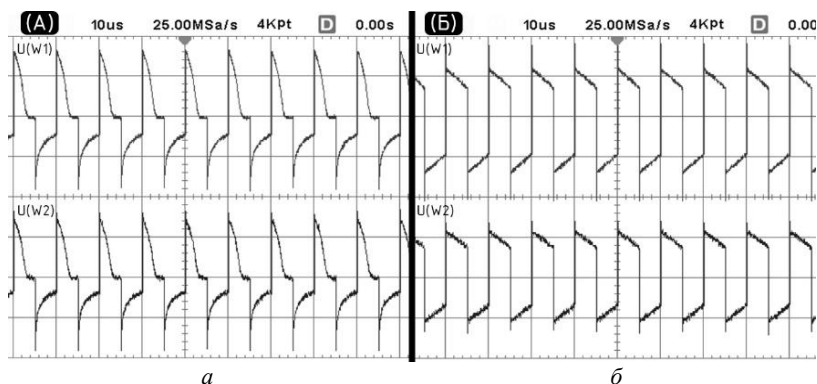


Рис. 2. Насыщение трансформатора при подаче однополярных импульсов

Проблема насыщения трансформатора решается добавлением к первичной обмотке последовательно включенного конденсатора. В результате экспериментов было определено, что емкость около 0,1 мкФ достаточна для достижения приемлемого результата, при этом наблюдается осциллограмма на рис. 2, *б*.

Для обеспечения достаточного тока затвора предлагается на вторичной стороне применить схему пушпульного драйвера на биполярных транзисторах. Ее питание возможно организовать цепью из нескольких последовательных резисторов и конденсатора, а также ограничивающего напряжение TVS-диода или стабилитрона. Заряд конденсатора достаточен для обеспечения нормальной зарядки входной емкости ключа, а для подзарядки не требуется значительного тока. Помимо этого, в случае использования импульса малой амплитуды на первичной стороне или его ослаблении дросселем синфазных помех, а также для обеспечения высокого импеданса цепи, возможно использовать каскады с общим эмиттером. Общая схема возможной реализации показана на рис. 3, а результаты выполнения моделирования – на рис. 4.

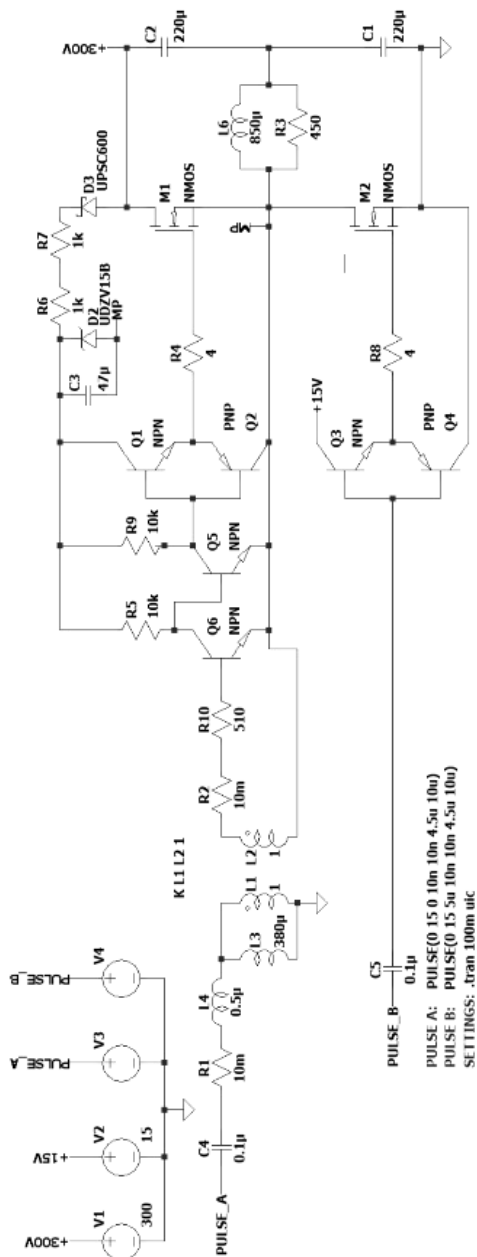


Рис. 3. Моделируемая схема

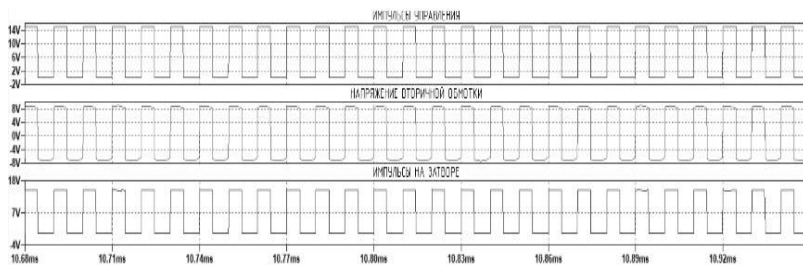


Рис. 4. Осциллограммы модели

По результатам моделирования возможно сделать вывод о перспективности применения подобных трансформаторов в качестве сигнальных в затворных цепях. Продолжается работа по разработке готовых к внедрению решений на их основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mazany A. Why use a Gate Drive Transformer? Application Note SLLA602 by TI. – Dallas, Texas: USA, March 2024.
2. Laszlo Balogh. Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits. Application Report SLUA618A by TI. – Dallas, Texas: USA, March 2017.

УДК 004.716

ВЫБОР ВИДА МОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО СЕТЯМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

М.А. Тихонова, А.О. Косолапова, студентки

Научный руководитель В.В. Егоров, ст. преп. каф. 408

г. Москва, МАИ, masha.tihonova.75@mail.ru

Проанализирован прототип модема PLC-связи, основанный на приеме и передаче радиоимпульсов в сеть электропитания на несущей частоте 60,15 кГц с шириной полосы приблизительно 10 кГц. Основным видом модуляции для данного модема была выбрана двух-частотная FSK, но на практике это решение не обеспечивало достаточной скорости обмена данными. В качестве альтернативы, на основании анализа различных модуляций была предложена FSK-модуляция с квадратурной передачей данных, подтвердившая свою эффективность в ходе эксперимента.

Ключевые слова: узкополосная PLC-связь, FSK-модуляция, квадратурная передача данных.

Современные производственные процессы осуществляются с применением множества различных станков, состояние которых для обеспечения качества и безопасности производства необходимо своевременно контролировать, т.е. требуется передача телеметрической информации оператору производства.

Данная информация может передаваться различными способами в соответствии со спецификой производства. Классически телеметрия передаётся с помощью беспроводной локальной сети (WLAN), либо по проводной локальной сети (Ethernet), либо по другим проводным стандартам связи.

Наиболее простым в данном случае является применение WLAN, так как не требует организации никакой дополнительной инфраструктуры на предприятии. Однако проблемой беспроводной передачи является безопасность – возможность хакерской атаки либо промышленной диверсии. При этом если от хакерской атаки можно обезопасить систему с помощью надёжного шифрования доступа в сеть, то для организации диверсии достаточно разрушить связь по WLAN с помощью постановщика помех. Тем самым надёжность беспроводной связи изначально невысока.

Проводные системы лишены недостатков прошлого варианта, так как они представляют собой внутреннюю проводную сеть предприятия, которая может не иметь выхода в глобальную сеть. Также проводная линия физически защищена от несанкционированного доступа, так как требует непосредственного контактного подключения.

Проблема данной системы заключается в организации такой сети. Большое количество проводов и необходимость их обслуживания делают затруднительным переоборудование уже существующих, а в особенности старых предприятий, под такую систему телеметрии.

В данной работе рассматривается вариант применения технологии PLC, предполагающий передачу телеметрической информации непосредственно по сетям электропитания одновременно с основной гармоникой сети электропитания. Отправка телеметрии по сетям электропитания обеспечивает безопасность и может быть реализована в уже имеющихся на предприятии условиях.

Существует множество стандартов для узкополосных PLC, разработанных крупными зарубежными организациями: CENELEC, FCC, ARIB, Homeplug Power Alliance, которые необходимы для реализации технологической совместимости и надёжной связи в сетях электропитания. Параметры некоторых из них приведены в таблице.

Под данные стандарты разрабатываются телекоммуникационные микросхемы следующими фирмами: Ангстрем – KP1446XK1, FSK,

скорость передачи 124...992 бит/с, диапазон частот 62,5, ..., 137,93 кГц, стоимость в России 190 руб./шт.; STMicroelectronics – ST7538/ST7540 FSK, скорость передачи 600, ..., 4800 бит/с, диапазон частот 60, ..., 132,5 кГц, стоимость в России 1050 руб./шт.

Параметры стандартов для узкополосной PLC-связи

Стандарт	Рабочая частота, кГц	Ширина полосы, кГц	Вид модуляции	Скорость передачи данных, кбит/с
PRIME	30–90	±60	OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	21–128
IEEE P1901.2	10–490	До 100	OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)	До 500
IEC 61334	60–76	10 и более	S-FSK (Spread – Frequency Shift Keying)	1,2–2,8

При обзоре рынка PLC-модемов отечественного производства был найден один аналог – ПШС01 (преобразователь широкополосных сигналов). Данное устройство преобразует сигналы интерфейса Ethernet в широкополосный сигнал для передачи по линиям электропередач 0,4/6(10)/35 кВ с использованием частот в диапазоне 2–34 МГц. Существование отечественного PLC-модема означает, что реализация PLC-технологии для передачи телеметрии станков на производстве в России является актуальной задачей и требует широкого исследовательского и опытно-конструкторского подхода.

На базе СКБ-4 МАИ был разработан прототип подобного модема, основанный на приёме и передаче радиоимпульсов в сеть электропитания на несущей частоте 60,15 кГц с шириной полосы приблизительно 10 кГц. Изначально в качестве основной модуляции для данного модема была применена двухчастотная FSK, частоты которой выбирались так, чтобы можно было применять стандартный демодулятор MT8870. Однако на практике данный демодулятор не смог обеспечить быстроту реакции на передачу символов (минимальная длительность символа составила 35 мс). В данной работе была поставлена задача выбора другого типа модуляции, обеспечивающего более высокую скорость передачи информации.

Были проанализированы различные виды модуляции с точки зрения применимости для решения данной задачи:

1. FSK (Frequency Shift Keying) – частотная манипуляция, метод цифровой модуляции, который использует изменение частоты несущего сигнала для передачи данных. В зависимости от битов данных

несущая частота изменяется между двумя или более фиксированными значениями:

а) преимущества: устойчивость к шумам и интерференции и простота реализации;

б) недостатки: привязка к ширине канала (при увеличении скорости передачи требуется больше полосы);

в) типы: 2-FSK (Binary FSK) – использует две частоты для представления 0 и 1 и M-FSK – использует M частот для представления M символов.

2. SFSK (Spectral Frequency Shift Keying) – синусоидальная частотная манипуляция, является расширением FSK и включает в себя спектральное размещение для уменьшения спектрального загрязнения. Этот метод тоже использует изменение частоты, но акцент делается на управление спектром сигнала:

а) преимущества: более эффективное использование частотного спектра, снижает вероятность перекрытия спектров с другими передатчиками;

б) недостатки: более сложные алгоритмы обработки сигналов, чем у классического FSK.

3. QAM (Quadrature Amplitude Modulation) – квадратурно-амплитудная модуляция, комбинирует амплитудную и фазовую модуляцию. В QAM используются изменения как в амплитуде, так и в фазе сигналов, что позволяет передавать больше битов за один символ:

а) преимущества: высокая эффективность спектра и возможность передачи большого объема данных, подходит для широкополосных каналов;

б) недостатки: чувствительность к шумам, падение качества сигнала может сильно влиять на передачу;

в) типы: QAM 16, 64, 256 и т.д., в зависимости от числа различных состояний (или символов), которые могут быть созданы с разными амплитудами и фазами.

На основании анализа модуляций был выбран вариант FSK модуляции с квадратурной передачей данных. Для проверки работы данной модуляции была применена микросхема SI5351 (генератор сигналов прямоугольной формы) и микроконтроллер Atmega328P-AU. Была написана программа, которая сформировала модуляционные посылки, которые передавались в сеть.

Был проведён эксперимент, в ходе которого данные были переданы в розетку через модем и принимались на расстоянии 100 м через гальваническую развязку на осциллографе. При этом оценивалась величина пакетной ошибки приёма данных. Структурная схема измерительной установки приведена на рис. 1.

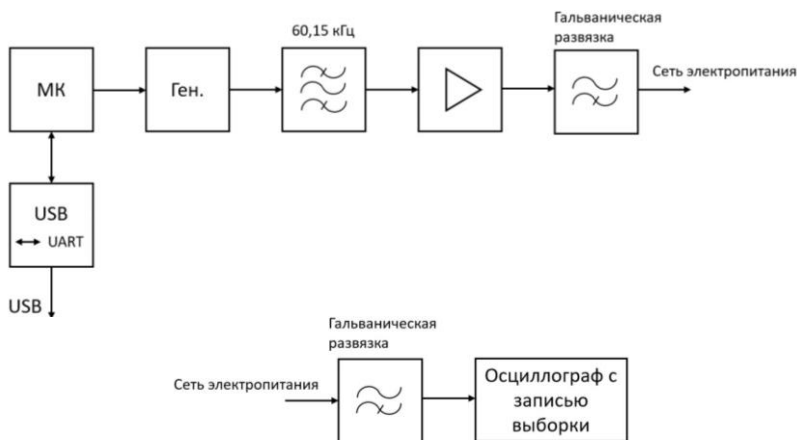


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки

Проведенный эксперимент подтвердил эффективность выбранного способа модуляции для решения задачи PLC-связи. Впоследствии предполагается разработка структурной и принципиальной схем приёмника и осуществление эксперимента в реальном времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий Ю. Микросхемы узкополосных приёмопередатчиков PLC для промышленного и бытового применения / Ю. Троицкий, А. Нестеров // Современная электроника. – 2008. – Т. 84, № 8. – С. 16–21.
2. Зимин В.В. Промышленные сети: учеб. пособие. – Н. Новгород: НГТУ, 2006. – 252 с.
3. Цицикян Г.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2006. – 59 с.

УДК 621.365.4

О МОСТОВЫХ ИНВЕРТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

*И.В. Зелинский, студент ПИШ; В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ,
к.т.н.; А.Е. Ильяшенко, вед. специалист отд. перспективных
разработок ООО «НПП «ЭЛСИТ»
г. Томск, ТУСУР, igor.zelinskii@tusur.ru*

Произведено сравнение мостового инвертора тока и мостового инвертора напряжения, применяемых в установках индукционного нагрева. Рассмотрены принципы работы этих инверторов и их осо-

бенности, определяемые применением, соответственно, параллельных или последовательных резонансных контуров, а также влияние некоторых факторов на потери и КПД.

Ключевые слова: индукционный нагрев, мостовой инвертор напряжения, мостовой инвертор тока.

Индукционный нагрев широко применяется в металлургии, машиностроении, медицинских и бытовых приборах, обеспечивая бесконтактную передачу тепловой энергии в нагреваемый объект. Для работы таких установок необходимы источники высокочастотной электроэнергии, которые преобразуют напряжение промышленной сети в переменное напряжение нужной частоты и мощности. Основу этих преобразователей составляют резонансные инверторы.

Существует два основных типа таких преобразователей: мостовой инвертор тока (ИТ) и мостовой инвертор напряжения (ИН), представленные на рис. 1.

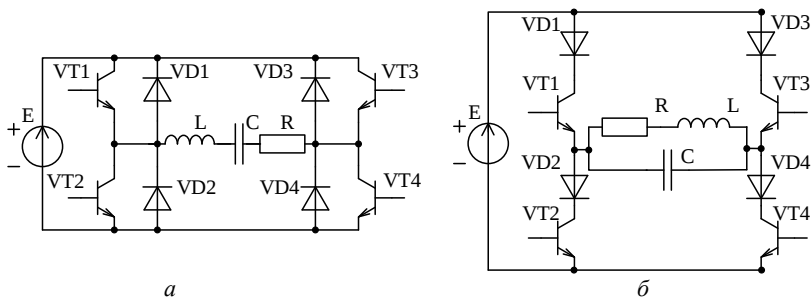


Рис. 1. Преобразователь частоты: а – на основе ИН; б – на основе ИТ

Оба варианта широко используются в установках индукционного нагрева, но их выбор зависит от требований к конкретной индукционной установке, характеристик нагрузки, уровня потерь и сложности управления. Исторически в мощных промышленных системах индукционного нагрева применялись тиристорные инверторы с последовательным или параллельным резонансным контуром, однако развитие мощных транзисторов (IGBT) позволило вытеснить их схемами с источником напряжения [1]. Несмотря на это, актуальным остается сравнительный анализ этих топологий, особенно с учётом появления транзисторов на карбиде кремния (SiC), превосходящих традиционные IGBT по частотным и энергетическим характеристикам.

В мостовом ИН с последовательным LC -контуром ключи управляют диагональными парами, формируя положительные и отрицательные полуволны выходного напряжения. Для предотвращения

сквозного тока между переключениями вводится dead-time, небольшая пауза, обычно составляющая несколько микросекунд, как показано на рис. 2.

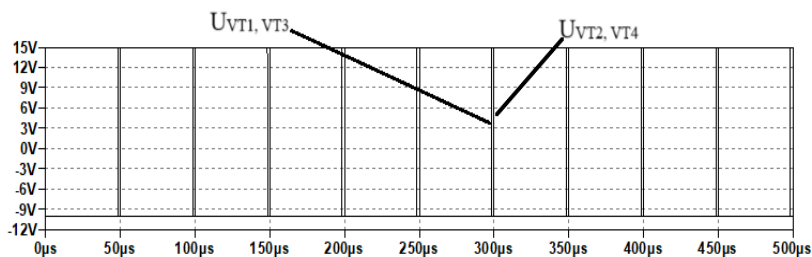


Рис. 2. Диаграммы сигналов управления транзисторами мостового ИН с паузой между интервалами проводящего состояния

Оптимальное значение dead-time определяется временем рассасывания зарядов носителей и перезаряда паразитных емкостей транзисторов. В ИН с последовательным резонансным контуром ток через ключи близок к синусоидальному благодаря резонансу. Это позволяет реализовать мягкую коммутацию: zero-current switching (ZCS), когда транзисторы выключаются при нулевом токе, снижая коммутационные потери, или zero-voltage switching (ZVS), когда включение транзисторов происходит при почти нулевом напряжении, что минимизирует потери на переключении. В таких системах управление мощностью осуществляется не только широтно-импульсной модуляцией, но и изменением частоты или фазового сдвига между плечами моста.

В мостовом ИТ последовательно с входным источником постоянного напряжения включен дроссель с «большой» индуктивностью, обеспечивающий постоянный ток. В отличие от ИН, где необходимо применять dead-time, в ИТ требуется перекрытие импульсов управления (overlap-time), как показано на рис. 3, так как разрыв тока при dead-time вызывает перенапряжение.

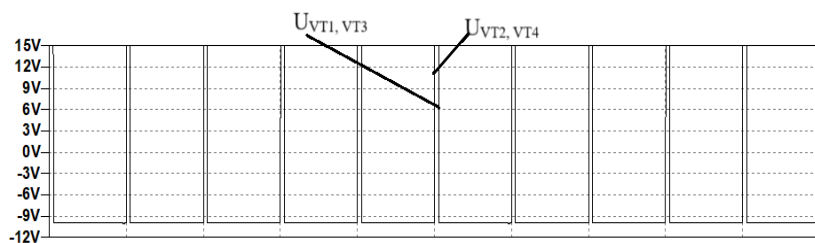


Рис. 3. Диаграммы сигналов управления транзисторами мостового ИТ с перекрытием интервалов проводящего состояния

При переключении с overlap-time вступающий в работу транзистор включается с опережением, а выходящий из работы – с задержкой, предотвращая обрыв тока. Перекрытие позволяет реализовать мягкую коммутацию: выключение транзисторов при нулевом токе (ZCS) и включение при низком напряжении (ZVS), снижая коммутационные потери.

ИН получили более широкое распространение в системах индукционного нагрева по нескольким причинам. Во-первых, они имеют относительно простую схему включения: отсутствует необходимость во включении последовательно с источником питания мощного дросселя, как это требуется в ИТ. Во-вторых, благодаря работе с последовательным резонансным контуром, ИН допускают регулирование выходной мощности как за счёт широтно-импульсной модуляции, так и за счёт изменения рабочей частоты, что позволяет эффективнее адаптировать их к различным видам нагрузок. В-третьих, применение современных высокочастотных ключей (IGBT, SiC) обеспечивает высокую энергоэффективность, компактность и надёжность таких схем. Эти особенности делают ИН удобным выбором для большинства промышленных и бытовых систем индукционного нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лавлесс Д.Л. Характеристики и параметры источников питания для эффективного индукционного нагрева / Д.Л. Лавлесс, Р.Л. Кук, В.И. Руднев // Силовая электроника. – 2007. – № 1.
2. Болотовский Ю.И. Обзор полупроводниковых источников питания для индукционного нагрева / Ю.И. Болотовский, Г.И. Таназлы // Силовая электроника. – 2007. – № 4.

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 621.383.45

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ УФ-ФОТОПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ГАЛЛИЯ

*Д.А. Алмаев, аспирант РФФ НИ ТГУ, преп. каф. КИПР;
А.В. Цымбалов, м.н.с.; В.В. Копьев, к.ф.-м.н., с.н.с. НИ ТГУ
г. Томск, НИ ТГУ, almaev001@mail.ru*

Проведено исследование фотоэлектрических характеристик структур $\text{Pt}/\text{Ga}_2\text{O}_3$, полученных в разных условиях, при воздействии ультрафиолетовым (УФ) излучением с длиной волны $\lambda = 254$ нм. Фотоприемники демонстрируют высокое быстродействие (~ 1 – 10 мс) и отношения сигнал/шум ($\sim 10^5$ отн. ед.).

Ключевые слова: фотоприемник, Ga_2O_3 , УФ-излучение, быстродействие.

Оксид галлия (Ga_2O_3) является ультраширокозонным полупроводником ($E_g = 4,4$ – $5,3$ эВ) n -типа проводимости, который имеет уникальные физико-химические свойства, удовлетворяющие требованиям современной электроники [1]. Наибольший интерес представляют исследование и разработка солнечно-слепых фотоприемников УФ-излучения резистивного типа на основе Ga_2O_3 , что обусловлено простотой изготовления, значением E_g , селективностью и внутренним усилением [2]. Целью данной работы является исследование влияния условий отжига на фотоэлектрические характеристики фоторезисторов на основе пленок Ga_2O_3 .

Пленки Ga_2O_3 были получены методом ВЧ-магнетронного распыления (RFMS) мишени Ga_2O_3 на гладкие сапфировые подложки.

Напыление пленок происходило в течение $t_g = 30$ и 60 мин. Был проведен отжиг пленок в воздухе при температуре $T_{an} = 700, 800$ и 900 °C в течение 30 мин. На поверхности пленок Ga_2O_3 формировались Pt-контакты с межэлектродным расстоянием 200 мкм.

На рис. 1 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) структур Pt/ Ga_2O_3 . Наблюдаются низкие значения темнового тока I_D , которые не превышают 100 пА. Увеличение t_g повышает значения I_D структур более чем на порядок величины. ВАХ Pt/ Ga_2O_3 является степенной, значения показателя степени для пленок Ga_2O_3 с $t_g = 30$ мин близки к 1, а для пленок Ga_2O_3 с $t_g = 60$ мин – зависимость сверхлинейная ($\approx 1,5$). Низкие значения I_D связаны с отжигом в атмосфере воздуха, что препятствует образованию вакансий кислорода V_O в пленке, которые играют роль доноров [3]. Резкий рост фототока при $T_{an} = 900$ °C можно объяснить кристаллизацией пленки [4].

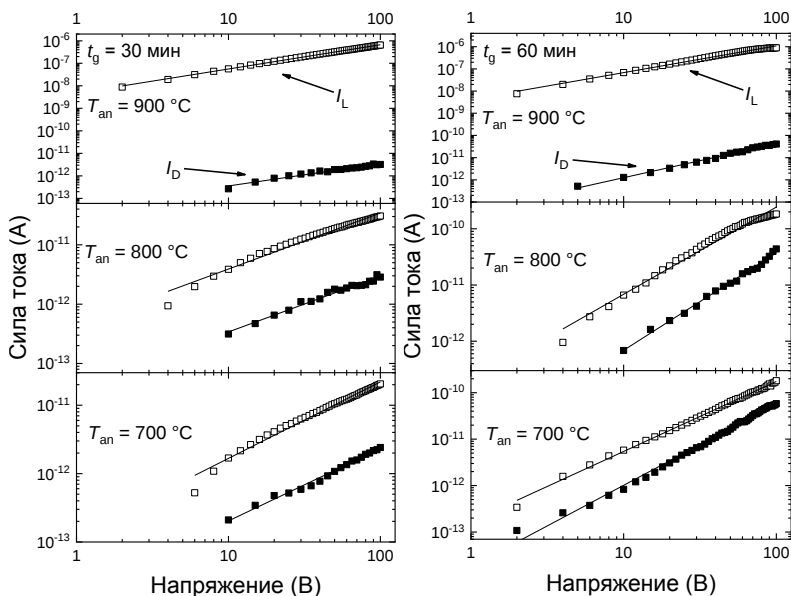


Рис. 1. ВАХ структур Pt/ Ga_2O_3 в темновых условиях и при воздействии УФ-излучением с $\lambda = 254$ нм. I_L – полный ток при освещении

Быстродействие фотодетекторов на основе структур Pt/ Ga_2O_3 было определено с помощью осциллограмм, представленных на рис. 2. Значения t_r и t_f были определены при $U = 10$ В и составили 6,1/1,1 и 7,6/2,0 мс для структур с $t_g = 30$ и 60 мин соответственно. Осциллограммы представлены для образцов, отожженных при $T_{an} = 900$ °C, так

как остальные образцы являются высокоомными даже при засветке. Представленные результаты демонстрируют связь между чувствительностью к УФ-излучению и быстродействием [5].

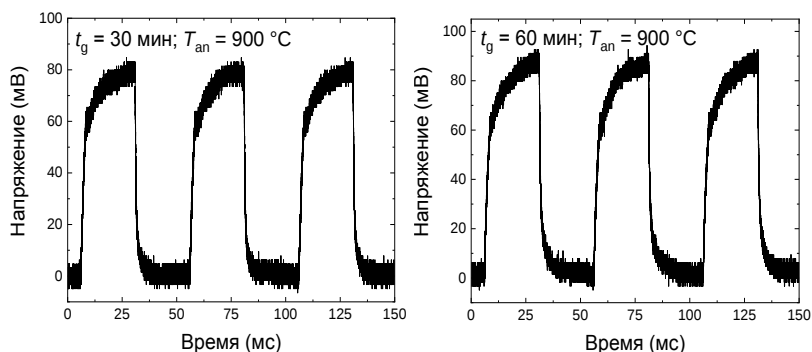


Рис. 2. Осциллограммы структур Pt/Ga₂O₃ при импульсной засветке УФ-светодиодом ($\lambda_{\text{max}} = 255 \text{ нм}$)

Эффективность сбора носителей характеризуется величиной внешней квантовой эффективности (EQE), которая определяется как произведение внутренней квантовой эффективности (IQE) и коэффициента усиления g . IQE – число фотогенерированных электронно-дырочных пар на один падающий фотон с определенной энергией в единицу времени, g показывает, сколько раз фотоноситель может пройти межэлектродный промежуток за время жизни [1]. Значение g определяется отношением времени жизни электронов к времени их пролета между контактами. Вероятно, отжиг в атмосфере воздуха привел к залечиванию V_O , что снизило время жизни электронов. Высокое время пролета между контактами может быть связано с относительно большим межэлектродным расстоянием [6].

В работе были исследованы фотоприемники на основе пленок Ga₂O₃, полученных методом RFMS. С ростом толщины пленки Ga₂O₃ повышается крутизна ВАХ, что обусловлено увеличением влияния объемных дефектов. Отжиг структур Pt/Ga₂O₃ при 900 °C в атмосфере воздуха приводит к росту значений фотоэлектрических характеристик более чем на 3 порядка величины независимо от толщины пленок. Фотоприемники на основе структуры Pt/Ga₂O₃ характеризуются высоким быстродействием, что может быть связано с залечиванием V_O при высокотемпературном отжиге в атмосфере воздуха.

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект № FSWM-2025-0021.

ЛИТЕРАТУРА

1. Review of gallium-oxide-based solar-blind ultraviolet photodetectors / X. Chen, F. Ren, S. Gu, J. Ye // *Photon. Res.* – 2019. – Vol. 7, № 4. – P. 381–415.
2. A review of Ga₂O₃ materials, processing, and devices / S.J. Pearton, J. Yang, P.H. Cary, F. Ren, J. Kim, M.J. Tadjer, M.A. Mastro // *Appl. Phys. Rev.* – 2018. – Vol. 5, No. 1. – P. 011301.
3. Performance improvement of amorphous Ga₂O₃ ultraviolet photodetector by annealing under oxygen atmosphere / C. Zhou, K. Liu, X. Chen, J. Feng, J. Yang, Z. Zhang, L. Liu, Y. Xia, D. Shen // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2020. – Vol. 840. – P. 155585.
4. Solar-Blind Ultraviolet Detectors Based on High-Quality HVPE α -Ga₂O₃ Films With Giant Responsivity / A. Almaev, V. Nikolaev, V. Kopyev, S. Shapenkov, N. Yakovlev, B. Kushnarev, A. Pechnikov, J. Deng, T. Izaak, A. Chikiryaka, M. Scheglov, A. Zarichny // *IEEE Sensors Journal.* – 2023. – Vol. 23, No. 17. – P. 19245–19255.
5. Effect of Traps on the UV Sensitivity of Gallium Oxide-Based Structures / V.M. Kalygina, A.V. Tsymbalov, P.M. Korusenko, A.V. Koroleva, E.V. Zhizhin // *Crystals.* – 2024. – Vol. 14, No. 3. – P. 268.
6. UV Detectors Based on In₂O₃–Ga₂O₃ Composite Films / A. Almaev, D. Almaev, V. Nikolaev, M. Scheglov, A. Chikiryaka, A. Pechnikov, P. Kosmachev, P. Korusenko, A. Koroleva, E. Zhizhin // *IEEE Sensors Journal.* – 2024. – Vol. 24, No. 17. – P. 27401–27410.

УДК 535.8

**РАСЧЁТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОПТИЧЕСКОГО
ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА
ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ВОДОРОДА В АТМОСФЕРЕ**
*И.В. Кузнецов, магистрант ПИШ; А.С. Перин, зав. лаб. ФИС
г. Томск, ТУСУР, igor.v.kuznetsov@tusur.ru*

Приводятся результаты численного моделирования зависимости эффективного показателя преломления оптического волновода от концентрации водорода в атмосфере. Показано, что возможно осуществлять детектирование изменения концентрации водорода посредством обнаружения возникающей фазовой задержки в волноводе с выпадающим полем, помещенным в водородосодержащую атмосферу.

Ключевые слова: нитрид кремния, ИМЦ, водород.

Водород (H₂) – не имеющий запаха и цвета легковоспламеняющийся газ, способный образовывать взрывоопасные смеси с воздухом. Контролировать уровень H₂ в атмосфере необходимо в некоторых областях промышленности. Сегодня в основном применяются датчи-

ки концентрации водорода, являющиеся термокаталитическими, электрохимическими и полупроводниковыми сенсорами. Поскольку сигналы, которые передают такие датчики, являются электрическими, системы, использующие полупроводниковые сенсоры концентрации водорода, потенциально уязвимы к электромагнитным помехам. Использование оптических чувствительных элементов позволит получить помехозащищенную систему обнаружения H_2 в атмосфере.

Известны датчики водорода на основе волоконно-оптических решений [1]. Принцип действия таких сенсоров основан на изменении ширины воздушного зазора в интерферометре Фабри–Перо, формируемом на торце оптического волокна (ОВ) путем нанесения нескольких нанослоев диэлектриков и металла. Изменение ширины воздушного зазора достигается благодаря диффузии H_2 в тонкую металлическую плёнку (например, в плёнку тантала). Недостатком такой конструкции является большое время реакции, составляющее от 10 до 200 с, обусловленное ограниченной скоростью диффузии H_2 в металл, а также сложность технологического процесса формирования такого интерферометра на торце ОВ.

Решения на основе технологий интегральной фотоники включают множество технологически отработанных процессов формирования фотонных структур, в первую очередь, в пленках кремния (Si) и нитрида кремния (SiN). SiN является более привлекательной платформой, поскольку волноводы на его основе имеют малое затухание ($< 0,2$ дБ/см).

Типичная конструкция интегрального оптического сенсора для анализа состава внешней среды представляет собой интерферометр Маха–Цендера (ИМЦ), одно из плеч которого освобождено от оболочки таким образом, чтобы внешняя среда работала в качестве оболочки волновода. Таким образом, в зависимости от химического состава внешней среды меняются условия распространения оптического излучения в волноводе и как следствие возникает фазовая задержка между оптическими волнами, прошедшими через разные плечи ИМЦ, что приводит к изменению интерференционной картины на выходе ИМЦ [2].

Целью работы является численное моделирование зависимости эффективного показателя преломления оптического волновода от концентрации H_2 в атмосфере.

Показатели преломления воздуха и водорода определяются по дисперсионным формулам, приведенным в работах [3, 4].

Поскольку в научной литературе нет данных о зависимости показателя преломления воздуха от концентрации H_2 , на данном этапе ра-

зумно предположить, что зависимость является линейной. Тогда для описания показателя преломления смеси воздуха и H_2 воспользуемся формулой

$$n = (1 - C_{H_2})n_{\text{air}} + C_{H_2}n_{H_2}, \quad (1)$$

где C_{H_2} – концентрация водорода в воздухе, n_{air} – показатель преломления воздуха, n_{H_2} – показатель преломления H_2 . В дальнейшем, по мере развития работы, данная зависимость может быть пересмотрена.

На рис. 1 приведена зависимость эффективного показателя преломления (n_{eff}) от концентрации водорода, полученная в результате численного моделирования со следующими параметрами волновода: ширина сердцевины волновода (SiN) 1,4 мкм, высота сердцевины 160 нм, высота подложки (SiO_2) 2 мкм, высота оболочки (смесь воздуха и H_2) 5 мкм. Дисперсионные уравнения показателей преломления SiO_2 и SiN приведены в работах [5, 6].

Из рис. 1 ясно, что изменение концентрации водорода на 1% приводит к изменению показателя преломления на величину $\Delta n_{\text{eff}} = 1,28 \cdot 10^{-8}$. Тогда разность фаз между плечами можно определить по формуле

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot (n_{\text{eff},1} \cdot L_1 - n_{\text{eff},2} \cdot L_2), \quad (2)$$

где $L_{1,2}$ – длины плеч. Рабочая точка чувствительного элемента – та величина $\Delta\varphi$, которая достигается при нулевой концентрации H_2 .

При моделировании принималось $L_1 = 320$ мкм, $L_2 = k \cdot L_1$, $k > 0$.

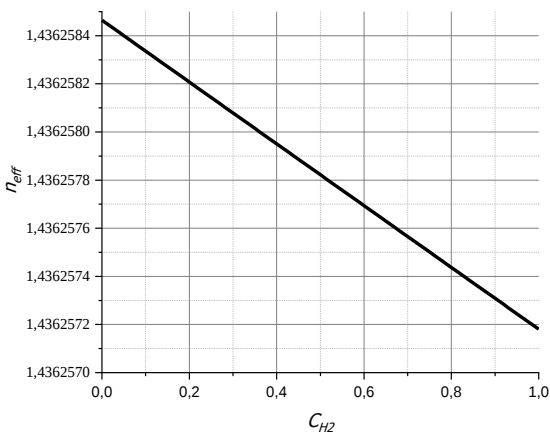


Рис. 1. Зависимость эффективного показателя преломления волновода от концентрации водорода

Интенсивность оптического излучения на выходе ИМЦ определяется формулой

$$I_1 = \frac{I_0}{2} \cdot (1 + \cos \Delta\varphi). \quad (3)$$

Из (2) и (3) рассчитаем, как изменяется зависимость разницы интенсивностей между нулевой и максимальной концентрацией водорода от соотношения длины плеч ИМЦ (k). Результат представлен на рис.2.

На рис. 2 видно, что по мере увеличения L_2 разница между интенсивностью при нулевой и максимальной концентрации H_2 возрастает. При этом провалы этой зависимости объясняются изменением положения рабочей точки, а максимальная разница достигается, когда рабочая точка находится в линейной части характеристики (3). Так, например, если рассчитать эту характеристику при $L_1 = 320$ мкм и $k = 28,83$, то разница мощности между указанными концентрациями составит $dI = 2,49\%$.

Таким образом, как можно понять из рис. 2, задача проектирования оптического чувствительного элемента H_2 сводится к подбору конфигурации ИМЦ таким образом, чтобы рабочая точка модулятора оказалась на линейном участке характеристики и при этом длина безоболочной области была максимальной. В дальнейшем стоит рассмотреть вопрос влияния температуры и атмосферного давления на положение рабочей точки и характеристику изменения показателя преломления смеси воздуха и H_2 , а также влияния разности потерь в плечах ИМЦ на формирование интерференционной картины.

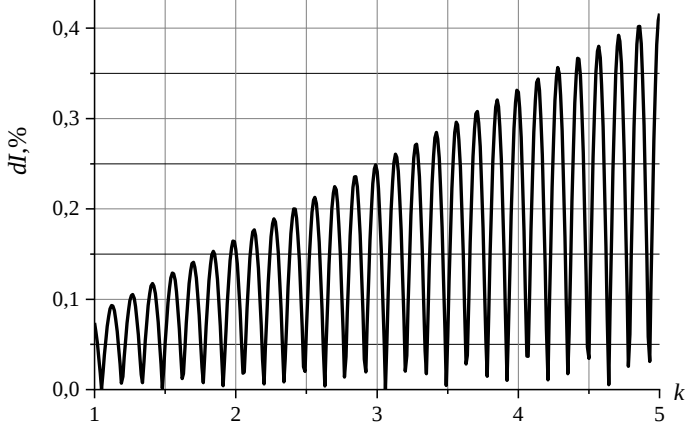


Рис. 2. Зависимость разницы интенсивностей между нулевой и максимальной концентрацией водорода от k

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. Минкин А.М. и др. Волоконно-оптический датчик концентрации водорода на базе интерферометра Фабри–Перо, изготовленный с использованием наноразмерных слоев $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}/\text{SiO}_2$ // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 25–41.
2. Martens D. Study on the limit of detection in MZI-based biosensor systems / D. Martens, P. Bienstman // Scientific reports. – 2019. – Vol. 9, No. 1. – P. 5767.
3. Ciddor P.E. Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared // Applied optics. – 1996. – Vol. 35, No. 9. – P. 1566–1573.
4. Peck E.R. Refractivity and dispersion of hydrogen in the visible and near infrared / E.R. Peck, S. Huang // JOSA. – 1977. – Vol. 67, No. 11. – P. 1550–1554.
5. Malitson I.H. Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica // Josa. – 1965. – Vol. 55, No. 10. – P. 1205–1209.
6. Luke K. et al. Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si_3N_4 microresonator // Optics letter. – 2015. – Vol. 40, No. 21. – P. 4823–4826.

УДК 621.383.525

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОДЕТЕКТОРОВ ГЕТЕРОСТРУКТУР $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{ZnGeP}_2$

С.Н. Подзывалов, аспирант НИИ ТГУ

*Научный руководитель В.М. Калыгина, доцент НИИ ТГУ
г. Томск, НИИ ТГУ, cginen@yandex.ru*

Исследованы временные характеристики фотодетекторов на основе гетероструктур $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{ZnGeP}_2$ под воздействием ультрафиолетового излучения с длиной волны 254 нм. Установлено, что легирование подложки ZnGeP_2 примесями Sn, Se, Pb или Zn не влияет на временные параметры образцов, а термический отжиг приводит к увеличению времени нарастания отклика и сокращению времени спада. Отсутствие эффекта persistent conductivity подтверждает стабильность и высокую скорость работы фотодетекторов. Результаты демонстрируют перспективность гетероструктур $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{ZnGeP}_2$ для применения в высокоскоростных УФ-детекторах.

Ключевые слова: оксид галлия, легирование, подложка ZnGeP_2 , УФ-излучение.

Актуальность исследования обусловлена возрастающим интересом к разработке высокоэффективных УФ-фотодетекторов на основе широкозонных полупроводников для применений в системах мониторинга окружающей среды, биомедицинской диагностике и системах безопасности. Гетероструктуры $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{ZnGeP}_2$ представляют особый интерес благодаря сочетанию уникальных свойств компонентов: широкой запрещенной зоны Ga_2O_3 ($\sim 4,8\text{--}5,3$ эВ) [1] и высокой подвижности носителей в ZnGeP_2 . Однако отсутствие надёжного метода получения $p\text{-Ga}_2\text{O}_3$ [2] и недостаточная изученность динамических характеристик таких структур, особенно влияния легирования и термической обработки, ограничивает их практическое применение.

Цель работы заключается в комплексном исследовании временных характеристик фотодетекторов на основе гетероструктур $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{ZnGeP}_2$ при УФ-облучении (254 нм) с акцентом на: анализ влияния различных типов легирования (Sn, Se, Pb, Zn) подложки ZnGeP_2 ; исследование эффектов термического отжига на динамические параметры; установление корреляции между составом, структурой и временными характеристиками; определение оптимальных условий обработки для достижения наилучших динамических параметров.

Особое внимание уделено механизмам быстрого восстановления фотопроводимости, что отличает данные структуры от традиционных детекторов на основе Ga_2O_3 . Работа направлена на устранение существующего разрыва между фундаментальными исследованиями свойств материалов и практическими требованиями к устройствам УФ-детектирования.

В работе использованы гетероструктуры с подложкой $p\text{-ZnGeP}_2$. Подложки ZnGeP_2 размером 10×10 мм² легировали примесями Sn, Se, Pb или Zn методом диффузии. Плёнку Ga_2O_3 толщиной ≈ 100 нм нанесли методом магнетронного напыления. Контакты Pt и In формировали для электрических измерений. Часть образцов отжигали при 300 °С в воздушной атмосфере.

Темновые и световые вольт-амперные характеристики измеряли с помощью источника-измерителя Keithley 2611B. В качестве источника УФ-излучения использовалась криптон-фторовая лампа VL-6.C с фильтром на 254 нм. Время отклика (t_r) и восстановления (t_a) составляли доли секунды, что свидетельствует о высокой скорости работы фотодетекторов.

Легирование ZGP не ухудшает временные параметры (таблица). На рис. 1 показаны изменения тока для структуры $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{ZnGeP}_2:\text{Pb}$ при напряжениях 0 и +1 В. Отсутствие эффекта persistent conductivity подтверждает стабильность образцов.

Времена нарастания и спада тока при включении и выключении излучения

Примесь	Время установления отклика в образцах без отжига, с	Постоянная времени спада без отжига, с	Время установления отклика после отжига, с	Постоянная времени спада после отжига, с
Undoped	0,091/12,040	0,089/5,520	2,246/83,16	1,33/1,36
Se (VI)	0,066/0,066	0,038/0,023	0,239/7,659	0,053/0,052
Sn(VI)	0,081/1,305	0,040/2,222	0,290/11,630	0,059/4,584
Zn (II)	0,255/0,255	0,074/0,074	0,131/9,470	0,073/0,073
Pb (IV)	0,018/0,105	0,071/2,53	5566,02/5533,5	6,296/26,961

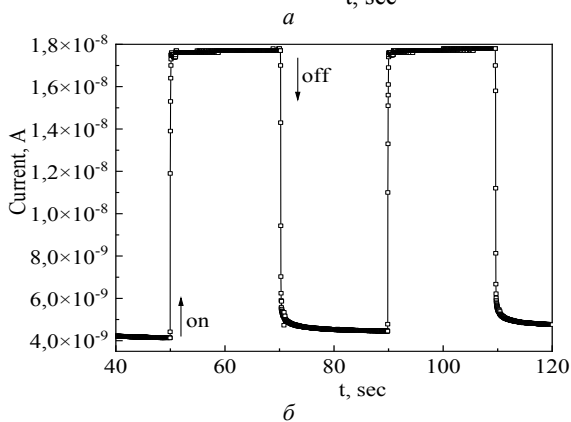
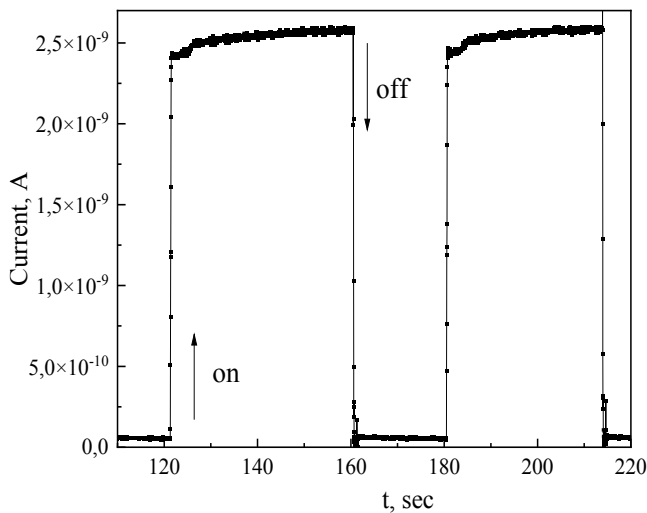


Рис. 1. Временной профиль зависимости тока структуры $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{ZnGeP}_2:\text{Pb}$ при $U = 0$ В (а) и $U = +1$ В (б)

Термический отжиг влияет на временные характеристики. Для отожжённых образцов характерно затягивание фронта нарастания отклика и более быстрое время спада (см. таблицу). Временные зависимости тока описаны уравнениями с экспоненциальными компонентами

$$I(t) = I_D + A \cdot e^{\frac{-t}{\tau_{r1}}} + B \cdot e^{\frac{-t}{\tau_{r2}}}, \quad I(t) = I_\lambda + C \cdot e^{\frac{-t}{\tau_{d1}}} + D \cdot e^{\frac{-t}{\tau_{d2}}},$$

где I_D – темновой ток, I_λ – значение тока во время действия излучения с $\lambda = 254$ нм, τ_{r1} и τ_{r2} – быстрая и медленная составляющие времени отклика соответственно, τ_{d1} и τ_{d2} – быстрая и медленная составляющие времени восстановления соответственно, A , B , C , D – константы, определяемые экспериментально.

Низкие времена восстановления обусловлены наличием источника подвижных дырок в ZnGeP_2 . При отрицательном смещении на Рт-контакте электроны переходят в ZGP, а дырки рекомбинируют в Ga_2O_3 . При положительном смещении дырки безбарьерно переходят в ZGP, поддерживая электронейтральность.

Результаты демонстрируют перспективность гетероструктур $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{ZnGeP}_2$ для УФ-детекторов. Для улучшения характеристик предложены оптимизация синтеза, легирование и пассивация поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pearton S.J. A review of Ga_2O_3 materials, processing, and devices / S.J. Pearton, J. Yang, P.H. Cary, F. Ren, J. Kim, M.J. Tadjer, M.A. Mastro // Applied Physics Reviews. – 2018. – Vol. 5. – P. 011301. DOI: 10.1063/1.5006941.
2. Li B. Gallium oxide (Ga_2O_3) heterogeneous and heterojunction power devices / B. Li, Y. Wang, Z. Luo, W. Xu, H. Gong, T. You, X. Ou, J. Ye, Y. Hao, G. Han. – Fundamental Research, 2023. DOI: 10.1016/j.fmre.2023.10.008.

УДК 621.315.592.3

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ZnGeP_2 ПРИ ГОМОГЕННОМ ЛЕГИРОВАНИИ Те

А.Б. Лысенко, Е.С. Слюнько, А.Ю. Кальсин,

*С.Н. Подывалов, аспиранты каф. РФФ; Н.Н. Юдин, директор
НОЦ «Оптические и фотонные технологии»*

г. Томск, НИИ ТГУ, festality@yandex.ru

Рассматривается влияние высокой концентрации Те, введенной в монокристалл ZnGeP_2 , на его оптические свойства. Установлено по-

ложительное влияние вносимой примеси на порог лазерного пробоя и коэффициент пропускания в ближней средней ИК-области спектра.

Ключевые слова: легирование полупроводников, оптический пробой, ZnGeP_2 , легирование теллуром.

Дифосфид цинка-германия (ZnGeP_2 , ZGP) относится к классу алмазоподобных полупроводниковых материалов с кристаллической структурой типа халькопирит. Обладая высоким коэффициентом нелинейной восприимчивости и высокими показателями лучевой прочности, дифосфид цинка-германия стал основой для целого комплекса источников когерентного ИК-излучения [1, 2].

В данной работе исследовано влияние легирования теллуром на оптические свойства дифосфида цинка-германия с целью улучшения его оптических характеристик, коэффициента пропускания и возможного увеличения порога оптического разрушения.

Теллур (Te) как легирующая примесь был выбран не случайно, как известно, соединения халькогенов, к которым относится теллур, прозрачны в широком диапазоне оптического спектра. Te из всех халькогенов имеет наиболее близкий радиус иона Te^{2-} к ионному радиусу аниона P^{3-} . Есть сведения, что введение Te в структуру полупроводника может уменьшить плотность дислокаций до нуля [3–6].

Легирование ZnGeP_2 осуществлялось элементарным теллуром в количестве 3% мас. Примесь вносилась на стадии синтеза из элементарных компонентов. После проведения процесса синтеза поликристаллическая буля извлекалась из синтезного контейнера и помещалась в ростовой тигель для выращивания на затравку методом Бриджмена.

Для исследования оптических свойств из монокристалла вырезались две пластины размером $20 \times 20 \times 3$ мм. Поверхности пластин были отшлифованы, затем отполированы на полировально-доводочном станке ПД-200.

Затем проводились измерения коэффициента пропускания и лучевой прочности пластин – рис. 1, 2 соответственно.

Благодаря сравнительному анализу кривых пропускания двух наборов образцов – не легированного без отжига, не легированного с отжигом, а также двух образцов, легированных Te без отжига и после отжига, хорошо прослеживается влияние атомов Te на коэффициент пропускания ZGP, интересным является тот факт, что постростовой отжиг менее эффективен в случае легированного материала.

Исходя из данных полученных при построении графиков вероятности оптического пробоя, легированный Te образец монокристалла ZGP показывает значительное увеличение LIDT с 1,1 до 2,0 Дж/см².

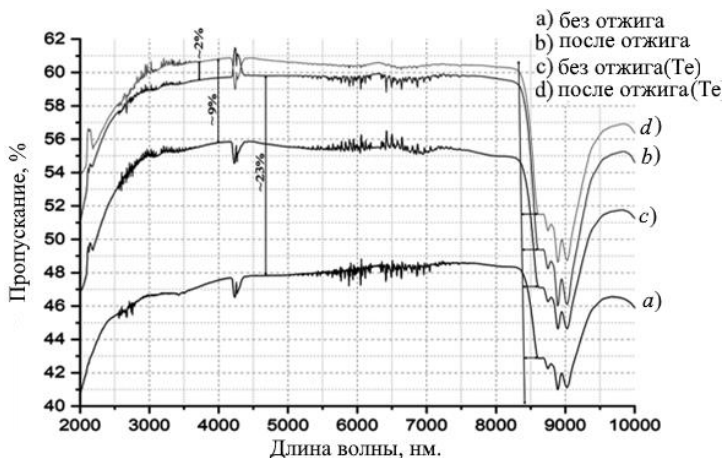


Рис. 1. Спектральные зависимости пропускания для нелегированного и легированных Те образцов в диапазоне длин волн 2 000–10 000 нм

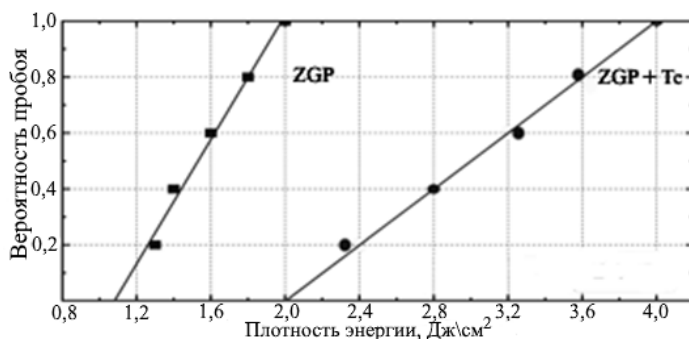


Рис. 2. Сравнительные графики вероятности оптического пробоя от мощности падающего излучения на длине волн 2,1 мкм

Полученные результаты демонстрируют, что введение высокой концентрации Те положительно влияет на оптические свойства ZnGeP_2 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Dmitriev V.G. Handbook of Nonlinear Optical Crystals / V.G. Dmitriev, G.G. Gurzadyan, D.N. Nikogosyan. – Springer Series in Optical Sciences. – Berlin: Springer, 1999. – 414 p.
2. Kittel C. Introduction to Solid State Physics. – New York: Wiley, 2004.
3. Мильвидский М.Г. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников / М.Г. Мильвидский, В.Б. Освенский. – М.: Металлургия, 1984. – 256 с.
4. Nikogosyan D.N. Nonlinear Optical Crystals: A Complete Survey. – Berlin: Springer, 2005. – 428 p.

5. Shackelford J.F. Materials Science and Engineering Handbook. – Boca Raton: CRC Press, 2015.

6. West A.R. Solid State Chemistry and its Applications. New York: Wiley, 2014.

УДК 535.421

**ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ ФИЛЬТР
ДЛЯ DWDM-СИСТЕМ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ
МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ
НЕОДНОРОДНЫХ КПЖК ФОТОННЫХ СТРУКТУР**

Ю.А. Алтухов, Д.М. Чубаров, студенты;

Д.С. Растрьгин, В.О. Долгирев, ассистенты;

С.Н. Шарангович, проф. каф. СВЧиКР

*Проект ГПО СВЧиКР-2304. Голографические дифракционные
структуры на основе фотополимеризующихся композиций
г. Томск, ТУСУР*

Представлены дифракционные характеристики оптических спектральных фильтров для DWDM-систем связи на основе мультиплексированных многослойных неоднородных голографических дифракционных структур, сформированных в капсулированных полимером нематических жидких кристаллах. В результате численного моделирования было выявлено, что использование метода мультиплексирования позволяет добиться увеличения числа каналов спектрального фильтра на коэффициент, кратный количеству записанных дифракционных решеток.

Ключевые слова: дифракция, мультиплексирование, МНГДС, КПЖК, DWDM.

Современные системы плотного волнового мультиплексирования (DWDM) играют ключевую роль в развитии высокоскоростных оптических сетей связи, обеспечивая передачу больших объемов данных на большие расстояния. Одной из важнейших задач в таких системах является эффективное разделение и фильтрация оптических сигналов на различных длинах волн. Для этого требуются оптические спектральные фильтры, обладающие высокой дифракционной эффективностью (ДЭ) и возможностью динамического управления.

В последние годы активно исследуются новые материалы и структуры для создания таких фильтров, среди которых особое внимание уделяется материалам с жидкими кристаллами благодаря их оптическим свойствам и возможности управления. В частном случае можно использовать мультиплексированные многослойные неодно-

родные голографические дифракционные структуры (МНГДС), сформированные в капсулированных полимером нематических жидких кристаллах (КПЖК) [1, 2], представляющие собой перспективный материал для разработки фотонных структур с управляемыми спектральными характеристиками [3]. Данные свойства делают их одним из возможных вариантов для использования в DWDM-системах.

Таким образом, целью данной работы является исследование электрически управляемого оптического спектрального фильтра на основе мультиплексированных МНГДС, сформированных в КПЖК, а также выявление закономерности по варьированию числа каналов путем мультиплексированной записи и воздействию внешнего электрического поля.

В качестве основных параметров для численного моделирования использовалась структура толщиной 20 мкм для дифракционного (d_n) и 294 мкм для буферного (t_n) слоя. Длина считывающей световой волны (λ_{read}) и записывающей световой волны (λ_0) равнялась 1550 нм. Количество дифракционных слоев (N) и количество решеток (N_h) равнялось $N = 3$ и $N_h = 3$. Углы поворота образца при последовательной записи для трехслойной МНГДС равнялись $\psi = (-11, 0, 11)$. Напряженность внешнего электрического поля (E) относительно критической напряженности Фредрикса (E_c) равнялась $E = 2E_c$. Данные параметры подобраны таким образом, чтобы локальные максимумы соответствовали DWDM-сетке с шириной канала, равной 0,8 нм.

На рис. 1 приведены угловые селективности стандартной и мультиплексированной трехслойной ГДС относительно длин волн DWDM-диапазона. Зависимость выражена в дБ относительно максимальной интенсивности излучения.

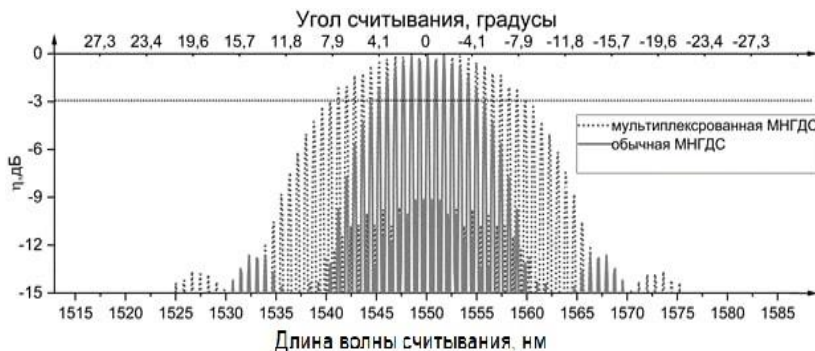


Рис. 1. Угловые селективности стандартной и мультиплексированной трехслойной ГДС

Из рис. 1 видно, что при использовании метода мультиплексирования можно добиться увеличения числа каналов спектрального фильтра на коэффициент, кратный количеству записанных дифракционных решеток.

На рис. 2 представлена зависимость ДЭ трехслойной мультиплексированной ГДС от значения напряженности внешнего электрического поля и угла считывания. Считывание проводилось линейно поляризованной волной с азимутом поляризации 0 град.

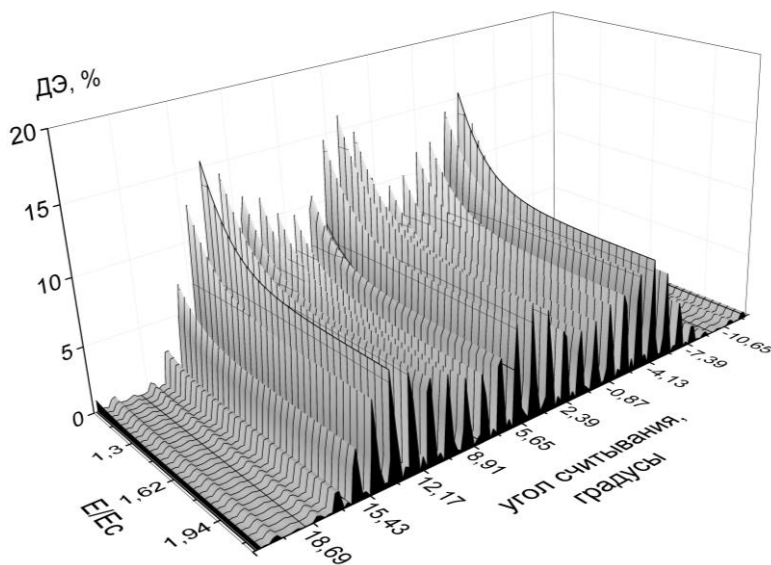


Рис. 2. Зависимость ДЭ трехслойной мультиплексированной МНГДС от значения напряженности внешнего электрического поля и угла считывания

Как видно из рис. 2, ДЭ снижается по уровню при воздействии внешнего электрического поля, что также позволяет управлять уровнем пропускания спектрального фильтра.

В данной работе в результате численного моделирования была показана возможность уширения спектральной полосы пропускания электрически управляемого оптического фильтра на основе мультиплексированных МНГДС с КПЖК. В данном случае удалось добиться увеличения числа каналов по уровню -3 дБ с 9 для обычной МНГДС до 27 для мультиплексированной МНГДС, что кратно количеству записанных структур. Также была продемонстрирована возможность управления числом каналов за счет воздействия внешнего электрического поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pen E.F., Rodionov M.Y. Properties of multilayer nonuniform holographic structures // Quantum Electron. – 2010. – Vol. 40. – P. 919–924.
2. Лойко В.А. Пропускание света слоем капсулированного полимером жидкого кристалла при неоднородном сцеплении на поверхности капле / В.А. Лойко, В.Я. Зырянов, А.В. Конколович, А.А. Мискевич // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 120, № 1. – С. 158–168.
3. Пен Е.Ф. Спектральные свойства каскада голографических отражательных решеток, разделенных однородным слоем / Е.Ф. Пен, М.Ю. Родионов, П.А. Чубаков // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 1. – С. 73–82.

УДК 621.375.826

**ВЛИЯНИЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ZnGeP_2
НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА**
*Е.С. Слюнько, А.Ю. Кальсин, С.Н. Подзывалов,
А.Б. Лысенко, аспиранты каф. РФФ;
Н.Н. Юдин, дир. НОЦ «Оптические и фотонные технологии»
г. Томск, НИ ТГУ, elenohka266@mail.ru*

Проведено комплексное исследование влияния различных факторов на величину оптического пробоя при проведении глубинных измерений на поверхности монокристалла ZnGeP_2 (ZGP) с использованием метода магнитореологического полирования (МРО). Установлена зависимость порога лазерно-индуцированного повреждения ZGP от глубины снятого слоя с рабочих граней кристалла. Выработаны рекомендации для оптимального значения глубины съема при использовании МРО.

Ключевые слова: ZGP, цинк-германий-фосфид, магнитореологическая полировка, порог лазерно-индуцированного повреждения.

ZnGeP_2 относится к классу халькопиритовых кристаллов с тетрагональной структурой (пространственная группа I-42d) [1]. Эта структура обеспечивает высокую нелинейную восприимчивость, что делает кристалл эффективным для нелинейно-оптических преобразований. ZnGeP_2 является одним из наиболее перспективных нелинейных кристаллов для применения в среднем ИК-диапазоне (инфракрасное излучение) благодаря своим уникальным оптическим и тепловым свойствам. Его высокая нелинейная восприимчивость, теплопроводность и порог оптического повреждения делают его предпочтительным выбором для задач нелинейной оптики.

Наиболее мощные ПГС (параметрический генератор света) в диапазоне длин волн 3,5–5 мкм созданы в настоящее время на основе нелинейно-оптических кристаллов ZGP [2]. Однако долговременная

работа без отказа мощных ПГС на основе ZGP ограничивается оптическим пробоем $\text{laser} - \text{induced damage threshold (LIDT)}$ поверхности данного материала. В связи с этим потенциал практического использования данных ПГС среднего ИК-диапазона неразрывно связан с повышением LIDT. Цель данной работы – провести исследование влияния МРО на оптическую прочность кристалла ZGP.

Анализ источников [3–5] показал, что отсутствуют исследования, описывающие влияние величины съема материала при различных способах полировки поверхности кристалла ZGP на значение LIDT.

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены четыре образца монокристалла ZGP, каждый из которых имел геометрические размеры $6 \times 6 \times 20$ мм. Данные образцы использовались для изучения характеристик оптического пробоя и анализа влияния параметров магнитореологического полирования на их поверхностные и глубинные свойства. В таблице приведены обобщенные сведения о выполненных МРО обработках для образцов № 1–4.

Сводные данные по обработке образцов ZGP

Образцы №	Традиционная обработка		Магнитореологическая обработка при глубинном съеме, мкм		
	Тонкое шлифование, съем 30 мкм	2-стадийное полирование, съем 50 мкм	17	150	38,15
1	+	+	–	–	–
2	+	–	–	+	–
3	+	–	–	–	+
4	+	+	+	–	–

Порог лазерно-индуцированного повреждения образцов ZGP определялся по методике «R-on-1» [6]. Методика «R-on-1» представляет собой последовательное облучение выбранного участка кристалла лазерными импульсами с постепенным увеличением интенсивности излучения до тех пор, пока не произойдет оптический пробой или не будет достигнута заданная величина плотности энергии. Постепенно плотность энергии увеличивалась с шагом примерно $0,1 \text{ Дж/см}^2$. Эксперимент завершался в момент появления видимых необратимых повреждений на рабочей грани образца ZGP. На рис. 1 представлены полученные результаты исследования порога лазерно-индуцированного повреждения для кристалла ZGP.

В рамках проведённого экспериментального исследования изучено влияние параметров магнитореологического полирования (МРО) на порог лазерно-индуцированного повреждения кристаллов ZGP. В зависимости от глубины снятого слоя за счет МРО величина LIDT кристалла ZGP может как увеличиваться, так и уменьшаться. Установлено, что при снятии более 30 мкм наблюдается снижение LIDT.

Оптимальная глубина съема за счет МРО была зафиксирована в районе 17,8 мкм.

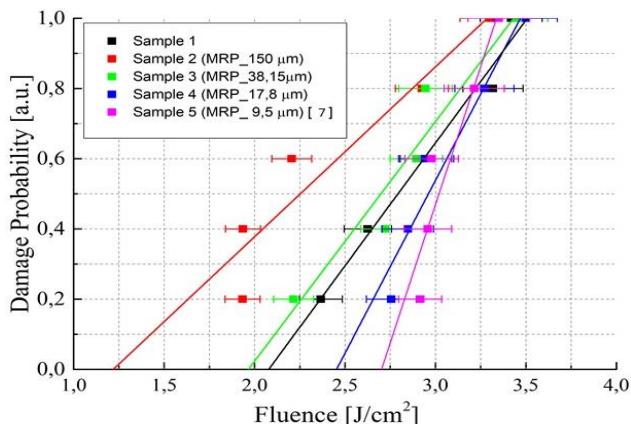


Рис. 1. Зависимость вероятности оптического пробоя образцов от плотности энергии падающего лазерного излучения

ЛИТЕРАТУРА

1. Высокоэффективная пикосекундная параметрическая суперлюминесценция в кристалле ZnGeP2 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. Advances in nonlinear optical materials for mid-infrared applications / P.G. Schunemann, K.T. Zawilski, L.A. Pomeranz, D.J. Creeden, P.A. Budni // J. Opt. Soc. Am. B. – 2016. – Vol. 33. – P. D36.
3. Effect of postgrowth processing technology and laser radiation parameters at wavelengths of 2091 and 1064 nm on the laser-induced damage threshold in ZnGeP2 single crystal / N.N. Yudin, O.L. Antipov, A.I. Gribenyukov, I.D. Eranov, S.N. Podzyvalov, M.M. Zinoviev, L.A. Voronin, E.V. Zhuravleva, M.P. Zykova // Quantum Electronics. – 2021. – Vol. 51. – P. 306–316.
4. Increasing the laser-induced damage threshold of single-crystal ZnGeP2 / K.T. Zawilski, S.D. Setzler, P.G. Schunemann, T.M. Pollak // J. Opt. Soc. Am. B. – 2006. – Vol. 23. – P. 2310–2316.
5. The Influence of Angstrom-Scale Roughness on the Laser-Induced Damage Threshold of Single-Crystal ZnGeP2 / N. Yudin, A. Khudoley, M. Zinoviev, S. Podzvalov, E. Slyunko, E. Zhuravleva, M. Kulesh, G. Gorodkin, P. Kumeysya, O. Antipov // Crystals. – 2022. – Vol. 12. – P. 83.
6. ISO 11146-1:2005. Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios. – Geneva: International Organization for Standardization, 2005.
7. ISO 2602:1980. Statistical interpretation of test results – Estimation of the mean – Confidence interval. – Geneva: International Organization for Standardization, 1980.

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 – Мецераков А.А., доцент каф. РТС, к.т.н.

<i>М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко, Р.С. Сухомлинов, К.М. Черкашин</i> Исследование влияния длины передаваемого пакета на помехоустойчивость канала связи LoRa	25
<i>М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко, Р.С. Сухомлинов, К.М. Черкашин</i> Анализ влияния степени кодирования LoRa модуляции на помехоустойчивость канала связи	29
<i>И.С. Гозадзе</i> Использование коммутационных сетей для обеспечения резервирования каналов передачи данных космических аппаратов	32
<i>Е.А. Григоренко, Т.А. Чепко</i> Применение квазипланарной конструкции трехсвязной полосковой линии в неотражающих полосно-пропускающих фильтрах	35
<i>А.А. Толстов, Г.А. Малютин</i> Моделирование неотражающих фильтров на квазипланарных связанных полосковых линиях	40
<i>Г.И. Ляхов</i> Влияние ошибок определения координат отражателей на определение дальности до ИРИ однопозиционной пассивной системы	44

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

<i>А.И. Боярчук</i> Анализ возможности синтеза модуля зарядного устройства комплекса автоматики и стабилизации космического аппарата в аспекте концепции цифрового двойника	49
<i>Е.К. Гончарова, А.А. Горелов, А.В. Картуков</i> Оценка влияния эксплуатационных условий на точность оптической системы посадки	51

А.П. Сваровский, М.А. Сафонова, В.В. Грахович Автоматизация пайплайна импорта 3D-моделей в Unreal Engine с использованием Python и Blender API	56
М.А. Сафонова, А.П. Сваровский, В.В. Грахович Интеграция физически корректных материалов (PBR) из Blender в Unreal Engine	59
Н.С. Хайбулин, М.И. Хацкевич Визуализация 3D-модели в реальном времени для 3D-модельеров с использованием технологий игровых движков	61
А.В. Лыхо, И.В. Тяпкин Навигационное обеспечение группового применения беспилотных авиационных систем	64
К.А. Нгуен Перспективы применения фазированных равномерных круговых антенных решеток для генерации радиолучей с ненулевым орбитальным угловым моментом	67
Н.М. Ооржак Алгоритм детектирования и определения направления гроз	72
Д.Е. Понамарев Использование аддитивных технологий при проектировании и производстве спиральных проводников и антенн	75
Т.Н. Пушкарёв Роль человеческого фактора в деятельности авиационной транспортной системы	78
В.Е. Щукин Разработка буферного усилителя 10,5–14,5 ГГц диапазона частот	81
Д.А. Вяткин Фильтр цифровой обработки данных радиолокационной станции на основе базового матричного кристалла	85

Подсекция 1.3

РАДИОТЕХНИКА

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

В.С. Костерова, Е.С. Морозов Экспериментальная реализация хаотической динамики в системе связанных автогенераторов	89
В.В. Сафенин, Е. Иваненко Моделирование интегральных схем дискретных аттенуаторов S-диапазона на основе отечественной 0,5 мкм GaAs-технологии	92

К.Е. Шушарина, М.А. Миягашев, А.А. Кокотов Разработка усилителя промежуточной частоты с цифровым управлением коэффициента передачи на основе отечественной КМОП-технологии	95
Н.А. Архипов Коррекция межсимвольных искажений при OQPSK-модуляции.....	99
Г.М. Дударев, М.А. Проскуряков, П.Л. Тимошин Пассивное акустическое обнаружение БПЛА: анализ методов, факторов влияния и разработка микрофонного модуля	101

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.**

Э.Д. Менухов, В.Х. Абдуллаев, К.С. Куприянова Реализация цифровых фильтров для обработки изображений	105
Е.В. Зайцева, Е.И. Арефьева Исследование влияния размера изображения на эффективность методов выравнивания гистограммы, применяемых к видеокадрам, полученным в нефтяных и газовых скважинах	109
Г.Е. Эдель Исследование влияния гауссовского шума на точность распознавания объектов моделью YOLOv11	112
И.В. Филимонов Программный модуль создания и редактирования графических элементов на растровых изображениях	116
Саура, А.А. Тисленко, В.В. Капустин Оптический контроль траектории движения роботизированного манипулятора с использованием алгоритма MiDas	119
Н.Б. Казаков, А.А. Филимонцева, А.В. Каменский Реализация системы идентификации пользователя и интерфейса управления базой данных для хранения 3D-видеоданных эндоскопических операций	123
И.Д. Колесников Реализация алгоритмов распознавания лиц для их сокрытия	127
П.В. Кудрявцев Изучение способов подавления шумов на цифровых изображениях	131
К.С. Куприянова Разработка элементов лабораторного практикума по изучению моделей шумов и способов их подавления для дисциплины «Видеинформационные системы»	134

И.Д. Мусихин	
Методика предобработки и разметки данных для создания датасета, предназначенного для обучения нейронной сети распознавания хирургических инструментов da Vinci	138
К.Д. Нигматуллин	
Разработка функций автоматического улучшения изображения для расширения функционала приложения фоторедактора	140
А.В. Новоренских	
Применение NeRF для создания трехмерных моделей объектов	144
А.В. Шалеев, А.И. Елизаров	
Методы коррекции изображений, полученных в условиях пониженной видимости	147
К.А. Шерифов	
Анализ современных технологий разработки приложений визуализации изображений	150
А.Н. Шлыкович	
Повышение качества изображений с использованием метода объединения соседних пикселей и алгоритма на базе SRGAN	152
В.С. Гринько, С.Ж. Шойнжурова	
Применение нейронных сетей для детекции хирургических инструментов .	155
С.Ю. Тырышкин	
Эмулированные квантовые вычисления: новые горизонты интеллектуальных видеоинформационных технологий	158
Е.В. Зайцева, А.В. Яковлев	
Исследование влияния форм гистограмм на уровень размытия видеокадров, полученных в нефтяных и газовых скважинах	161
С.А. Забуга	
Обучение и тестирование модели нейронной сети с использованием 3D-видеоданных для задачи распознавания хирургических инструментов da Vinci	164
Ч.Х. Фан, А.С. Захлебин, М.И. Курачий	
Оценка эффективности винеровской фильтрации при восстановлении смазанных изображений с БПЛА	167

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*

А.Д. Рязанов, В.И. Горохов	
Сравнительный анализ MQTT-клиентов	171

Д.Е. Ильинский, С.А. Еремеев, Я.В. Крюков Разработка элементарной ячейки для реконфигурируемой интеллектуальной поверхности	173
Р.А. Порваткин Разработка алгоритма детектирования сигнала по преамбуле на ПЛИС	176
С.А. Наумов, Е.В. Рогожников Модель аналогового передающего тракта для портативной базовой станции LTE	180
К.В. Савенко, К.В. Диноченко Моделирование канала передачи данных по линии питания постоянного тока БПЛА	184
С.Ю. Землянухин Метод оптимизации QNCD в задаче повышения спектральной эффективности низкоорбитальной спутниковой группировки с MU-MIMO..	187

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.*

И.А. Данилов, Н.Е. Исайченко, В.Е. Борнашов, А.Е. Горяинов Внедрение модуля расстановки элементов принципиальных схем для САПР СВЧ-устройств	190
А.А. Зувич, К.Н. Полушвайко, Т.Р. Рафигов, В.Е. Борнашов Модификация способа задания структурных требований в программе поиска порядка включения секций многоразрядных СВЧ-устройств	193
Р.С. Титова, А.В. Мирошников, Д.В. Дей, В.Д. Москвин Программный модуль «Диаграмма Смита–Вольперта» для САПР СВЧ-устройств	196

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*

А.С. Чехранова

Влияние длительности ультразвуковой обработки на электрофизические характеристики композитов с углеродными наноструктурами201

Е.В. Парахина, А.А. Швадленко

Определение внутренней квантовой эффективности светоизлучающих диодов по статическим характеристикам204

Н.Ф. Яровая, Е.В. Парахина

Медико-биологические проблемы светодиодного освещения.....207

А.А. Швадленко, Е.А. Тюриков

Определение внешней квантовой эффективности светоизлучающих диодов210

А.В. Куликов, Е.И. Тренкаль

Алгоритм функционирования устройства регистрации ЭКГ больных раннего послеоперационного периода213

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.*

Е.А. Драч

Измерение скорости звука с помощью разностно-фазового метода217

О.В. Кустов, Е.И. Тренкаль

Экспериментальное исследование алгоритмов определения траектории на основе DMP и фильтра Маджвика.....221

М.А. Мотовилов

Схема управления источником-измерителем для тестирования фотонных интегральных схем225

Д.С. Фадеева, С.А. Подлиннов, И.А. Резаев

Исследование диэлектрических свойств материалов методом открытого конца коаксиальной линии228

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.В. Долгова, Ж.Э. Дагри, А.С. Климов Моделирование термического расширения эмиссионного электрода форвакуумного плазменного источника ленточного электронного пучка	231
М.А. Свириденко, Р.Ж. Касеинов, В. Кирнев, Н.А. Шулаев, С.Ю. Удовиченко Разработка и исследование мемристоров на основе оксида гафния с Т-образной топологией.....	234
В.Е. Аркатов, А.В. Казаков, Н.А. Панченко Исследование задержки инициирования магнетронного разряда в форвакуумном плазменном источнике электронов	237
В.М. Компаниец Технология формирования планарных волноводных структур с применением тонких пленок ИТО	240
Т.С. Шляхов Синтез карбида титана на трехфазной электродуговой установке.....	243
А.А. Токарева, М.В. Шубин Точность формирования фоторезистивных масок на установках экспонирования.....	247

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.

В.В. Белоцерковский, М.М. Поддубный, К.А. Ахтырский, В.Д. Семенов Имитационная модель стабилизатора переменного напряжения на ключах переменного тока.....	250
К.А. Ахтырский, В.А. Кабилов, В.Д. Семенов Алгоритм резервирования универсальных модулей стабилизации напряжения в составе системы электропитания космического аппарата	254
В.В. Белоцерковский, М.М. Поддубный, К.А. Ахтырский, В.Д. Семенов Имитационная модель стабилизатора переменного напряжения с фазовым регулированием	258
А.Д. Гончаров, М.М. Байк Анализ режимов работы резонансного LCL-преобразователя	261

К.Ж. Калжанов, В.Д. Семенов Имитационная модель трехфазного инвертора с векторной системой управления в среде MatLab/Simulink.....	267
П.А. Стрельников, Г.А. Кобзев, В.Д. Семенов Векторное управление активным корректором коэффициента мощности.....	272
Д.И. Лукьяненко Преимущества малосерийного производства аккумуляторных батарей АР-2к и АБ-18	275
Е.Ю. Пономарев, Н.Н. Рагимов, С.М. Мартемьянов Способ построения импульсных преобразователей напряжения на основе eGaN-транзисторов.....	278
К.А. Редлих, В.Д. Семенов Имитационная модель понижающего DC/DC-преобразователя модульного типа на основе мостового инвертора напряжения в среде MatLab.....	281
Г.Ф. Сергеев Использование трансформаторов гальванической развязки Ethernet в качестве драйверных трансформаторов в импульсных источниках питания	288
М.А. Тихонова, А.О. Косолапова Выбор вида модуляции для эффективной передачи данных по сетям электропитания на производстве	292
И.В. Зелинский, В.Д. Семенов, А.Е. Ильяшенко О мостовых инверторах напряжения и тока в преобразователях частоты для индукционного нагрева	296

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*

Д.А. Алмаев, А.В. Цымбалов, В.В. Копьев Быстродействующие УФ-фотоприемники на основе пленок оксида галлия	300
И.В. Кузнецов, А.С. Перин Расчёт диэлектрического оптического чувствительного элемента для детектирования водорода в атмосфере.....	303

<i>С.Н. Подзывалов</i>	
Влияние ультрафиолетового излучения на временные характеристики фотодетекторов гетероструктур Ga ₂ O ₃ /ZnGeP ₂	307
<i>А.Б. Лысенко, Е.С. Слюнько, А.Ю. Кальсин, С.Н. Подзывалов, Н.Н. Юдин</i>	
Влияние высокой концентрации примеси на оптические свойства ZnGeP ₂ при гомогенном легировании Те.....	310
<i>Ю.А. Алтухов, Д.М. Чубаров, Д.С. Растрьгин, В.О. Долгирев, С.Н. Шарангович</i>	
Оптический спектральный фильтр для DWDM-систем связи на основе мультиплексированных многослойных неоднородных КПЖК фотонных структур	313
<i>Е.С. Слюнько, А.Ю. Кальсин, С.Н. Подзывалов, А.Б. Лысенко, Н.Н. Юдин</i>	
Влияние магнитореологической обработки нелинейных элементов ZnGeP ₂ на оптические свойства кристалла	316

Научное издание

Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР

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

21–23 мая 2025 г., г. Томск

В трех частях

Часть 1

Корректор – **В.Г. Лихачева**
Верстка **В.М. Бочкаревой**

Сдано на верстку 20.04.2025. Подписано к печати 29.05.2025.
Формат 60×84¹/₁₆. Печать трафаретная. Печ. л. 20,5
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