



Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники



РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ



РАДИОКОНСТРУКТОРСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ



ФАКУЛЬТЕТ  
ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ



ФАКУЛЬТЕТ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ



ФАКУЛЬТЕТ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ



ГУМАНИТАРНЫЙ  
ФАКУЛЬТЕТ



ФАКУЛЬТЕТ  
БЕЗОПАСНОСТИ



ЭКОНОМИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ



ФАКУЛЬТЕТ  
ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



ЮРИДИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ



ЗАОЧНЫЙ И ВЕЧЕРНИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ



ФАКУЛЬТЕТ  
ДИСТАНЦИОННОГО  
ОБУЧЕНИЯ



**ВЫБИРАЯ БУДУЩЕЕ,  
ВЫБИРАЙ TUSUR!**

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, каб. 129 E-mail: [onir@main.tusur.ru](mailto:onir@main.tusur.ru)  
Телефон/Факс: (3822) 900-100 Сайт: <http://tusur.ru/>

Информационный центр абитуриента: [magistrant.tusur.ru](http://magistrant.tusur.ru)

## НАУЧНАЯ СЕССИЯ TUSUR-2022



МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ  
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
«НАУЧНАЯ СЕССИЯ TUSUR-2022»  
г. Томск, 18–20 мая 2022 г.  
(в трех частях)

**ЧАСТЬ 1**

г. Томск

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)»

# **НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2022**

**Материалы**  
Международной научно-технической конференции  
студентов, аспирантов и молодых ученых  
«Научная сессия ТУСУР–2022»

**18–20 мая 2022 г., г. Томск**

**В трех частях**

Часть 1

В-Спектр  
Томск, 2022

**УДК 621.37/.39+681.518 (063)**

**ББК 32.84я431+32.988я431**

**Н 34**

**Н 34 Научная сессия ТУСУР–2022:** материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 18–20 мая 2022 г.: в 3 частях. – Томск: В-Спектр, 2022. – Ч. 1. – 286 с.

ISBN 978-5-91191-475-2

ISBN 978-5-91191-476-9 (Ч. 1)

ISBN 978-5-91191-477-6 (Ч. 2)

ISBN 978-5-91191-478-3 (Ч. 3)

Материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых посвящены различным аспектам разработки, исследования и практического применения радиотехнических, телевизионных и телекоммуникационных систем и устройств, сетей электро- и радиосвязи, вопросам проектирования и технологии радиоэлектронных средств, аудиовизуальной техники, бытовой радиоэлектронной аппаратуры, а также автоматизированных систем управления и проектирования. Рассматриваются проблемы электроники СВЧ- и акустооптоэлектроники, нанопотоники, 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 978-5-91191-476-9**

**ISBN 978-5-91191-477-6 (Ч. 1)**

© Том. гос. ун-т систем управления  
и радиоэлектроники, 2022

**Международная  
научно-техническая конференция  
студентов, аспирантов и молодых ученых  
«Научная сессия ТУСУР–2022»,  
18–20 мая 2022 г.**

**ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ**

- Рулевский В.М. – председатель программного комитета, ректор ТУСУРа, д.т.н.;
- Лошилов А.Г. – заместитель председателя программного комитета, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, к.т.н.;
- Абдрахманова М.В., директор библиотеки ТУСУРа;
- Афонасова М.А., зав. каф. менеджмента ТУСУРа, д.э.н., проф.;
- Бабур-Карателли Г.П., к.т.н., PhD (TU Delft), научный сотрудник каф. TOP ТУСУРа;
- Беляев Б.А., зав. лаб. электродинамики и СВЧ-электроники Ин-та физики СО РАН, д.т.н., г. Красноярск;
- Ботаева Л.Б., руководитель направления по оказанию инжиниринговых услуг, АНО «Томский региональный инжиниринговый центр», к.т.н.;
- Васильковская Н.Б., доцент каф. экономики ТУСУРа, к.э.н.;
- Голиков А.М., доцент каф. РТС ТУСУРа, к.т.н.;
- Дмитриев В.М., проф. каф. КСУП ТУСУРа, д.т.н., проф.;
- Еханин С.Г., проф. каф. КУДР ТУСУРа, д.ф.-м.н.;
- Заболоцкий А.М., проф. каф. ТУ ТУСУРа, д.т.н.;
- Зайцева Е.В., доцент каф. информатики и компьютерных технологий Санкт-Петербургского горного университета, к.т.н., г. Санкт-Петербург;
- Зариковская Н.В., доцент каф. АОИ ТУСУРа, к.ф.-м.н.;
- Зейниденов А.К., PhD, декан физико-технического факультета НАО Карагандинского университета им. акад. Е.А. Букетова, проф., г. Караганда (Казахстан);
- 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.;
- Кобзев Г.А., проректор по международному сотрудничеству, к.т.н.;
- Костина М.А., доцент каф. УИ, к.т.н.;
- Коцубинский В.П., зам. зав. каф. КСУП ТУСУРа, доцент каф. КСУП, к.т.н.;
- Красинский С.Л., декан ЮФ ТУСУРа, к.и.н.;
- Карауш А.С., ген. директор Государственной публичной научно-технической библиотеки России (ГПНТБ России), к.т.н., г. Москва;
- Лукин В.П., зав. лаб. когерентной и адаптивной оптики ИОА СО РАН, почетный член Американского оптического общества, д.ф.-м.н., проф., г. Томск;

- Малюк А.А., проф. отделения интеллектуальных кибернетических систем офиса образовательных программ, Институт интеллектуальных кибернетических систем НИЯУ МИФИ, к.т.н., г. Москва;
- Малютин Н.Д., гл.н.с. НИИ систем электрической связи, проф. каф. КУДР ТУСУРа, д.т.н.;
- Мелихов С.В., проф. каф. РТС, д.т.н.;
- Мицель А.А., проф. каф. АСУ ТУСУРа, д.т.н.;
- Мозгунов А.В., начальник ОНиР ТУСУРа;
- Озеркин Д.В., декан РКФ ТУСУРа, к.т.н.;
- Оскирко В.О., н.с. лаборатории прикладной электроники ИСЭ СО РАН, технический директор ООО «Прикладная электроника», к.т.н.
- Покровская Е.М., зав. каф. ИЯ ТУСУРа, к.филос.н.;
- Разинкин В.П., проф. каф. ТОР НГТУ, д.т.н., г. Новосибирск;
- Рогожников Е.В., зав. каф. ТОР ТУСУРа, к.т.н.;
- Ромакина О.М., доцент каф. информатики и компьютерных технологий Санкт-Петербургского горного университета, к.ф.-м.н., г. Санкт-Петербург;
- Ромашко Р.В., член-корреспондент РАН, директор ИАПУ ДВО РАН, проф. ДВФУ, д.ф.-м.н., проф., г. Владивосток;
- Семенов В.Д., проф. каф. ПрЭ ТУСУРа, к.т.н.;
- Семенов Э.В., проф. каф. РСС ТУСУРа, д.т.н.;
- Сенченко П.В., проректор по учебной работе ТУСУРа, доцент каф. АОИ, к.т.н.;
- Соломин С.К., зав. каф. ГП ТУСУРа, д.ю.н.;
- Сулова Т.И., декан ГФ ТУСУРа, д.филос.н., проф.;
- Титов В.С., проф. каф. вычислительной техники Юго-Западного государственного университета, д.т.н., проф., заслуженный деятель наук РФ, академик Международной академии наук ВШ, г. Курск;
- Троян П.Е., зав. каф. ФЭ ТУСУРа, д.т.н., проф.;
- Туев В.И., зав. каф. РЭТЭМ ТУСУРа, д.т.н., проф.;
- Ходашинский И.А., проф. каф. КИБЭВС ТУСУРа, д.т.н.;
- Цветкова Н.А., доцент Высшей школы киберфизических систем и управления Института компьютерных наук и технологий Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, к.т.н., г. Санкт-Петербург;
- Чжан Е.А., зам. директора Института космических и информационных технологий (ИКИТ) по научной работе, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», к.т.н.;
- Шарангович С.Н., проф., зав. каф. СВЧиКР ТУСУРа, к.ф.-м.н.;
- Шелупанов А.А., президент ТУСУРа, директор ИСИБ, д.т.н., проф.;
- Шостак А.С., проф. каф. КИПР ТУСУРа, д.т.н.;
- Шурыгин Ю.А., директор департамента управления и стратегического развития ТУСУРа, зав. каф. КСУП, д.т.н., проф.;
- Issakov V., professor at University Otto-von-Guericke Magdeburg, Germany;
- Caratelli D., PhD, professor of the Department of Electrical Engineering (Eindhoven University of Technology), technical director of the company «The Antenna Company Nederland B.V.»;
- Krozer V., professor at Goethe University, Frankfurt am Main.

## ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

- Лошилов А.Г. – председатель организационного комитета, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, зав. каф. КУДР, к.т.н.;
- Медовник А.В. – заместитель председателя организационного комитета, начальник научного управления, к.т.н.;
- Байгулова Т.А., председатель студенческого научного сообщества «Система», студентка каф. УИ;
- Боберь Ю.Н., специалист по учебно-методической работе ОАиД;
- Климов А.С., председатель Совета молодых ученых, ст. научный сотрудник лаборатории плазменной электроники каф. физики, д.т.н.;
- Коротина Т.Ю., заведующая аспирантурой, ОАиД, к.т.н.;
- Михальченко Т.С., техник ОНиР;
- Покровская Е.М., зав. каф. ИЯ, к.филос.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 – Мелихов Сергей Всеволодович, проф. каф. РТС, д.т.н.; зам. председателя – Аникин Алексей Сергеевич, доцент каф. РТС, к.т.н.

*Подсекция 1.2. Проектирование и эксплуатация радиоэлектронных средств.* Председатель секции – Шостак Аркадий Степанович, проф. каф. КИПР, д.т.н.; зам. председателя – Озёркин Денис Витальевич, декан РКФ, к.т.н.

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

*Подсекция 1.4. Видеоинформационные технологии.* Председатель секции – Курячий Михаил Иванович, доцент каф. ТУ, к.т.н.; зам. председателя – Каменский Андрей Викторович, доцент каф. ТУ, к.т.н.

*Подсекция 1.5. Инфокоммуникационные технологии и системы широкополосного беспроводного доступа.* Председатель секции – Рогожников Евгений Васильевич, зав. каф. ТОР, к.т.н.

*Подсекция 1.6. Робототехника.* Председатель секции – Коцубинский Владислав Петрович, доцент каф. КСУП, к.т.н.

*Подсекция 1.7. Интеллектуальные системы проектирования технических устройств.* Председатель секции – Шурыгин Юрий Алексеевич, директор департамента управления и стратегического развития ТУСУРа, зав. каф. КСУП, д.т.н., проф.; зам. председателя – Черкашин Михаил Владимирович, декан ФВС, 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.; зам. председателя – Романовский Михаил Николаевич, доцент каф. КУДР, к.т.н.

*Подсекция 2.2. Разработка контрольно-измерительной аппаратуры.* Председатель секции – Лошилов Антон Геннадьевич, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, зав. каф. КУДР, к.т.н.; зам. председателя – Бомбизов Александр Александрович, начальник СКБ «Смена», к.т.н.

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

*Подсекция 2.4. Промышленная электроника.* Председатель секции – Семёнов Валерий Дмитриевич, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.; зам. председателя – Мехальченко Сергей Геннадьевич, зав. каф. ПрЭ, д.т.н.; Оскирко Владимир Олегович, н.с. лаборатории прикладной электроники ИСЭ СО РАН, технический директор ООО «Прикладная электроника», к.т.н.

*Подсекция 2.5. Оптические информационные технологии, нанофотоника и оптоэлектроника.* Председатель секции – Шарангович Сергей Николаевич, проф., зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н.; зам. председателя – Перин Антон Сергеевич, доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.

*Подсекция 2.6. Электромагнитная совместимость.* Председатель секции – Заболоцкий Александр Михайлович, проф. каф. ТУ, д.т.н.; зам. председателя – Куксенко Сергей Петрович, доцент каф. ТУ, д.т.н.

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

## **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, проректор по учебной работе ТУСУРа, доцент каф. АОИ, к.т.н.; зам. председателя – Сидоров Анатолий Анатольевич, зав. каф. АОИ, к.т.н.

*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.

*Подсекция 3.4. Вычислительный интеллект.* Председатель секции –

Ходашинский Илья Александрович, проф. каф. КИБЭВС, д.т.н.; зам. председателя – Сарин Константин Сергеевич, доцент каф. КИБЭВС, к.т.н.

*Подсекция 3.5. Современные библиотечные технологии.* Председатель

секции – Абдрахманова Марина Викторовна, директор библиотеки ТУСУРа; зам. председателя – Карауш Александр Сергеевич, генеральный директор ГПНТБ России, г. Москва, к.т.н.

*Подсекция 3.6. 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, к.ф.-м.н.

*Подсекция 3.7. Разработка программного обеспечения.* Председатель

секции – Зариковская Наталья Вячеславовна, доцент каф. АОИ, ген. директор ООО «АльдераСофт», к.ф.-м.н.; зам. председателя – Колотаев Илья Владимирович, старший разработчик ООО «Синкретис».

*Подсекция 3.8. Инструментальные средства поддержки автоматизи-*

*рованного проектирования и управления.* 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. Информа-*

*ционная безопасность.* Председатель секции – Шелупанов Александр Александрович, президент ТУСУРа, директор ИСИБ, д.т.н., проф.; зам. председателя – Новохрестов Алексей Константинович, доцент каф. КИБЭВС, к.т.н.

*Подсекция 4.2. Цифровые системы радиосвязи и средства их защи-*

*ты.* Председатель секции – Голиков Александр Михайлович, доцент каф. РТС, к.т.н.; зам. председателя – Громов Вячеслав Александрович, доцент каф. РТС, к.т.н.

*Подсекция 4.3. Экономическая безопасность.* Председатель секции –

Кузьмина Елена Александровна, доцент каф. КИБЭВС, к.т.н.; зам. председателя – Колтайс Андрей Станиславович, преподаватель каф. КИБЭВС.

## **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, доцент каф. АСУ, к.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 – Цибульникова Валерия Юрьевна, зав. каф. экономики, к.э.н.

*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, декан ЭФ, доцент каф. менеджмента, к.э.н.

*Подсекция 5.5. Современные социокультурные технологии в организации работы с молодежью.* Председатель секции – Орлова Вера Вениаминовна, и.о. зав. каф. ФиС, директор НОЦ «СГТ», д.соц.н.; зам. председателя – Корнющенко-Ермолаева Наталия Сергеевна, ст. преподаватель каф. ФиС.

*Подсекция 5.6. Актуальные проблемы социальной работы в современном обществе.* Председатель секции – Ким Максим Юрьевич, зав. каф. ИСР, к.и.н.; зам. председателя – Куренков Артем Валериевич, доцент каф. ИСР, к.и.н.

*Подсекция 5.7. Актуальные проблемы российского частного права.* Председатель секции – Соломин Сергей Константинович, зав. каф. ГП, д.ю.н., доцент; зам. председателя – Чурилов Алексей Юрьевич, доцент каф. ГП, к.ю.н.

*Подсекция 5.8. Современные тенденции развития российского права.* Председатель секции – Демидов Николай Вольтович, доцент каф. ТП, к.ю.н.; зам. председателя – Мельникова Валентина Григорьевна, зав. каф. ИП, к.ю.н.

## **Секция 6. Экология и мониторинг окружающей среды. Безопасность жизнедеятельности.** Председатель секции – Карташев Александр Георгиевич, проф. каф. РЭТЭМ, д.б.н.; зам. предсе-

дателя – Денисова Татьяна Владимировна, доцент каф. РЭТЭМ, к.б.н.

**Секция 7. Открытия. Творчество. Проекты.** (Секция для школьников). Председатель секции – Мозгунов Алексей Викторович, начальник ОНиР; зам. председателя – Михальченко Татьяна Сергеевна, техник ОНиР.

**Секция 8. Postgraduate and Master Students' Research in Electronics and Control Systems.** (Секция на английском языке). Председатель секции – Покровская Елена Михайловна, зав. каф. ИЯ, к.филос.н.; зам. председателя – Шпит Елена Ирismetовна, 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-я часть** – 1-я секция (подсекции 1.1–1.6); 2-я секция (подсекции 2.1–2.7).

**2-я часть** – 3-я секция (подсекции 3.1–3.8); 6-я секция; 8-я секция.

**3-я часть** – 4-я секция (подсекции 4.1–4.3); 5-я секция (подсекции 5.1–5.8).

7-я секция издана отдельным сборником.

## *Спонсор конференции – АО «НПФ «Микран»*



АО «НПФ «Микран»  
634041 г. Томск,  
проспект Кирова, д. 51д

382-2 90 00 29 Т.  
382-2 42 36 15 Ф.  
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.

## Спонсор конференции – АО «ПКК Миландр»



АО «ПКК Миландр» 495 981 5433 Т.  
124498, г. Москва, Зеленоград, 495 981 5436 Ф.  
Георгиевский проспект, д. 5 [www.milandr.ru](http://www.milandr.ru)

---

АО «ПКК Миландр» (г. Зеленоград) является одним из ведущих предприятий радиоэлектронного комплекса России. Основная специализация компании – реализация проектов в области разработки и производства изделий микроэлектроники (микроконтроллеры, микропроцессоры, микросхемы памяти, микросхемы приемопередатчиков, микросхемы преобразователей напряжения, радиочастотные схемы), универсальных электронных модулей и приборов промышленного и коммерческого назначения, разработки программного обеспечения для современных информационных систем и изделий микроэлектроники.

Отличительная особенность предприятия – это обеспечение создания интегральных микросхем и электронных модулей от процессов проектирования и производства инновационных продуктов, востребованных рынком, до постоянного технического сопровождения всех реализованных проектов.

Основными потребителями изделий под маркой «Миландр» являются российские приборостроительные предприятия – изготовители аппаратуры связи, радиотехнических систем, бортовых вычислителей и систем телеметрии.

«Миландр» имеет свои представительства в городах: **Москва, Воронеж, Санкт-Петербург.**

Офисные и производственные помещения, занимаемые компанией, составляют свыше **22 000 м<sup>2</sup>**, включая **1 260 м<sup>2</sup>** чистых производственных помещений.

В коллективе компании работают 650 высококвалифицированных специалистов, включая 22 кандидата наук и двух докторов наук.

Система менеджмента качества предприятия соответствует требованиям ГОСТ ISO 9001–2011 и распространяется на разработку и производство интегральных микросхем, пьезоэлектрических приборов и электромеханических фильтров, металлокерамических корпусов интегральных микросхем, многокристальных модулей и микросборок, источников вторичного электропитания и радиоэлектронной аппаратуры.

В 2014 г. АО «ПКК Миландр» совместно с Томским государственным университетом систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) и Томским государственным архитектурно-строительным университетом (ТГАСУ) одержали победу в конкурсе по созданию высокотехнологичного производства интеллектуальных приборов энергетического учета, разработанных и изготовленных на базе отечественных микроэлектронных компонентов, и гетерогенной автоматизированной системы мониторинга потребляемых энергоресурсов на их основе, выполняемом по Постановлению Правительства Российской Федерации № 218. Для выполнения работ по комплексному проекту АО «ПКК Миландр» и ТУСУР открыли Центр системного проектирования. В Центре системного проектирования (ЦСП ТУСУР), созданном на базе ТУСУР, разрабатывается программное обеспечение для интеллектуальных приборов энергоучёта и комплексной системы автоматизированного сбора и обработки информации. Результаты работ Центра системного проектирования будут не только внедряться в производство, но и активно использоваться в учебном процессе ТУСУР. Широкое внедрение совместных разработок АО «ПКК Миландр», ТУСУР и ТГАСУ позволит снизить затраты населения за тепло и электроэнергию на 15–20%.

Также АО «ПКК Миландр» активно проводит различные программы по взаимодействию с вузами: предоставляет вузам оборудование собственного производства и методические пособия для проведения практических занятий на все время сотрудничества. По окончании курсов проводится аттестация студентов, по результатам которой самые выдающиеся студенты получают сертификаты. Проект реализуется под эгидой импортозамещения, позволяет студентам российских вузов приобрести навыки работы с отечественной элементной базой и иметь преимущество при трудоустройстве в ведущие приборостроительные предприятия России.

Суммарно компанией передано на безвозмездной основе 20 различных отладочных комплектов. Оборудование используется на трех кафедрах:

- компьютерные системы в управлении и проектировании (КСУП);
- телекоммуникации и основы радиотехники (ТОР);
- комплексная информационная безопасность электронно-вычислительных систем (КИБЭВС).

Начиная с 2014 г. компания является партнёром по развитию ТУСУРа и выступает ежегодным генеральным спонсором научно-практических конференций для студентов, аспирантов и молодых ученых: Международной научно-практической конференции «Элек-

тронные средства и системы управления» и «Научная сессия ТУСУР». В ходе работы секций регулярно представлены результаты исследований по ряду фундаментальных проблем, а также результаты проектов, выполняемых по грантам, федеральной целевой программе «Исследования и разработки» и в рамках Постановления Правительства РФ № 218.

В 2016 г. в ТУСУРе создана базовая кафедра микроэлектроники, информационных технологий и управляющих систем (МИТУС) с применением дистанционного обучения, которая сможет решать приоритетные задачи по интеграции образования и науки в производство. Компания нацелена на то, чтобы выпускники кафедры стали незаменимыми сотрудниками различных предприятий радиоэлектронной промышленности и были востребованными специалистами на современном рынке труда. Для этого АО «ПКК Миландр» предоставил своей кафедре самую актуальную материально-методическую базу и обеспечил другими возможными ресурсами компании.

Компания 50ohm Technologies разрабатывает программное обеспечение для автоматизации измерений, построения моделей компонентов и проектирования ВЧ- и СВЧ-радиоэлектронных устройств.

50ohm Technologies предлагает решения задач автоматизации рабочих процессов с учётом индивидуальных особенностей предприятия. Миссия компании – разрабатывать удобные, умные, интеллектуальные инструменты, которые помогают инженерам в области СВЧ-электроники быстро решать возникающие задачи.

Компания разрабатывает программные решения по направлениям:

- автоматизация измерений устройств электроники и радиоэлектроники;
- базы данных результатов измерений и их автоматическая обработка;
- автоматизация проектирования СВЧ-устройств;
- построение моделей электронных компонентов;
- подготовка научно-технической документации.

Компания обладает компетенциями в использовании методов искусственного интеллекта и экспертных систем. Внедрение данных технологий на предприятие позволяет перейти на качественно новый уровень и автоматизировать наиболее рутинные этапы бизнес-процессов.

50ohm Technologies предлагает услуги по разработке систем автоматизации измерений, реализуемых на основе оборудования заказчика. Использование готовых сценариев измерений конкретных компонентов и устройств в значительной степени сократит время тестирования и повысит эффективность измерений. 50ohm Technologies производит разработку решений автоматизированной генерации технической документации по типовым шаблонам – от оформления графиков до формирования готовых документов.

Компания обладает значительным опытом построения моделей пассивных и активных СВЧ-компонентов. Создание программного обеспечения на основе общепринятых и авторских методик в значительной степени упрощает и автоматизирует процесс построения мо-

делей, уменьшая временные и финансовые затраты предприятия на данном этапе.

Наиболее сложным этапом в процессе проектирования СВЧ-устройства является получение схемотехнического и топологического решений. За годы научной работы коллектив получил успешный опыт разработки и использования программных модулей САПР, основанных на методах искусственного интеллекта. Такие программы позволяют получить целый набор решений, из которых разработчик может выбрать наиболее подходящее для дальнейшей реализации. Также компания занимается автоматизацией проектных операций в популярных коммерческих САПР СВЧ-устройств и интеграцией между ними.

*Директор ООО «50ом Технолджиз»  
Калентьев Алексей Анатольевич*



***СЕКЦИЯ 1***

**РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

(стр. 19 – 159)

***СЕКЦИЯ 2***

**ЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

(стр. 161 – 276)



## **СЕКЦИЯ 1**

### **РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ**

#### **ПОДСЕКЦИЯ 1.1**

##### **РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

*Председатель – Мелихов С.В., проф. каф. РТС, д.т.н.;*  
*зам. председателя – Аникин А.С., доцент каф. РТС, к.т.н.*

УДК 004.932

##### **ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА СОВМЕЩЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

***В.А. Иванов, студент каф. РТС***

*Научный руководитель – А.А. Мецерьков, доцент каф. РТС, к.т.н.*  
*Проект ГПО РТС-1902 «Разработка и исследование методов форми-*  
*рования изображения земной поверхности и алгоритмов автомати-*  
*ческого распознавания наземных объектов в бортовых интегрирован-*  
*ных радиолокационно-оптических комплексах»*  
*г. Томск, ТУСУР, ivanov76-86@mail.ru*

Предлагается быстрый и эффективный метод совмещения радиолокационных изображений для создания высокоинформативного объединенного изображения. Для совмещения изображений предлагается метод на основе управляемой фильтрации, позволяющий полностью использовать пространственную согласованность.

**Ключевые слова:** совмещение изображений, управляемый фильтр, двухуровневая декомпозиция.

Для повышения информативности РЛИ с целью обнаружения и распознавания на них объектов применяются различные методы совмещения (слияния).

Данная работа посвящена реализации одного из методов совмещения.

На рис. 1 представлены схема метода совмещения изображений и его основные этапы на основе управляемой фильтрации [1].

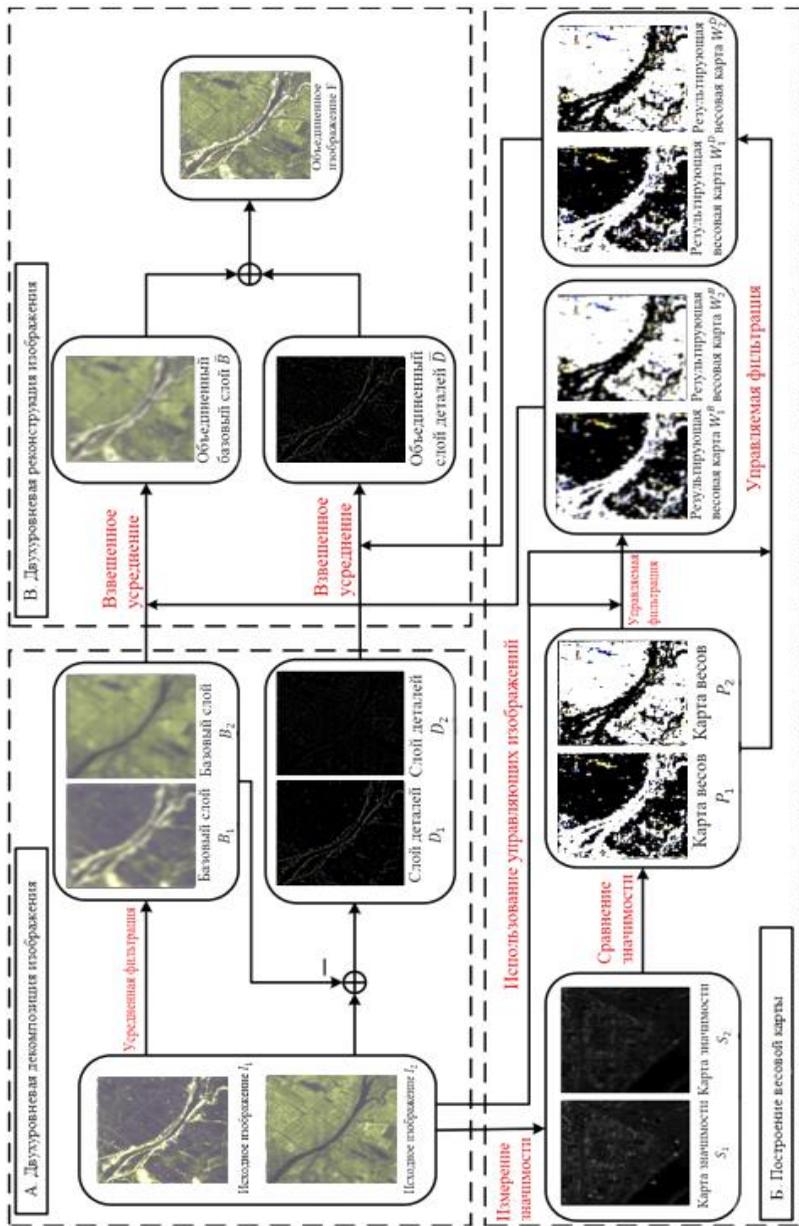


Рис. 1. Схема метода совмещения изображений на основе управляемой фильтрации

Алгоритм совмещения изображений заключается в следующем.

А. Выполняется двухуровневая декомпозиция изображения.

Исходные изображения (см. рис. 1) сначала раскладываются на двухуровневые представления с помощью усредненной фильтрации. Базовый слой  $B_n$  каждого исходного изображения получается следующим образом:

$$B_n = I_n \cdot Z,$$

где  $I_n$  –  $n$ -е исходное изображение,  $Z$  – усредняющий фильтр, и размер усредняющего фильтра условно задается равным  $31 \times 31$ .

После получения базового слоя формируется слой деталей  $D_n$  путем вычитания базового слоя из исходного изображения:

$$D_n = I_n - B_n.$$

Двухуровневая декомпозиция направлена на разделение каждого исходного изображения на базовый слой, содержащий крупномасштабные вариации интенсивности, и слой деталей, содержащий мелкие детали.

Б. Строится весовая карта с помощью управляемой фильтрации.

Сначала к каждому исходному изображению применяется фильтрация Лапласа [1], чтобы получить высокочастотное изображение  $H_n$ :

$$H_n = I_n \cdot L,$$

где  $L$  – фильтр Лапласа  $3 \times 3$ .

Затем среднее абсолютное значение  $H_n$  используется для построения карты значимости  $S_n$  [1]:

$$S_n = |H_n| \cdot g_{r_g, \sigma_g},$$

где  $g$  – гауссовский фильтр низких частот размером  $(2r_g + 1)(2r_g + 1)$ , а параметры  $r_g$  и  $\sigma_g$  установлены равными 5.

Измеренные карты значимости обеспечивают хорошую детализацию информации. Далее карты значимости сравниваются для определения весовых карт следующим образом:

$$P_n^k = \begin{cases} 1 & \text{если } S_n^k = \max(S_1^k, S_2^k, \dots, S_N^k), \\ 0, & \text{наоборот,} \end{cases}$$

где  $N$  – количество исходных изображений,  $S_n^k$  – значение значимости пикселя  $k$  на  $n$ -м изображении.

Весовые карты обычно зашумлены и не совпадают с границами объекта, что приводит к появлению артефактов на объединенном изображении. Эффективным способом решения этой проблемы является использование пространственной согласованности [2]. Простран-

ственная согласованность означает, что если два соседних пикселя имеют одинаковую яркость или цвет, они будут иметь одинаковые веса [2]. Один из подходов слияния основан на пространственной согласованности, которая заключается в формулировании энергетической функции, в которой значимость пикселей кодируется в заданные функции, а выравнивание весов по краям обеспечивается с помощью регулирующих условий [2].

Программная реализация алгоритма совмещения, основанная на методе оптимизации фильтрации управляющего изображения, выполняется на каждой весовой карте  $P_n$  с соответствующим исходным изображением  $I_n$ , служащим в качестве управляющего изображения:

$$W_n^B = G_{\eta_1, \epsilon_1}(P_n, I_n), \quad W_n^D = G_{\eta_2, \epsilon_2}(P_n, I_n),$$

где  $\eta_1$ ,  $\epsilon_1$ ,  $\eta_2$  и  $\epsilon_2$  – параметры управляемого фильтра,  $W_n^B$  и  $W_n^D$  – результирующие весовые карты базового и детального слоев.

Значения  $N$  весовых карт нормализуются таким образом, чтобы их сумма равнялась единице в каждом пикселе  $k$ .

В. Производится двухуровневая реконструкция изображения.

Двухуровневая реконструкция изображения состоит из двух этапов. Во-первых, базовый и детальный слои различных исходных изображений сливаются вместе путем взвешенного усреднения:

$$\bar{B} = \sum_{n=1}^N W_n^B B_n, \quad \bar{D} = \sum_{n=1}^N W_n^D D_n.$$

Затем объединенное изображение  $F$  получается путем комбинирования объединенного базового слоя  $\bar{B}$  и объединенного детального слоя  $\bar{D}$ .

$$F = \bar{B} + \bar{D}.$$

Данный метод совмещения проверялся на радиолокационных изображениях земной поверхности, полученных в двух диапазонах длин волн. Исходные изображения приведены на рис. 2.

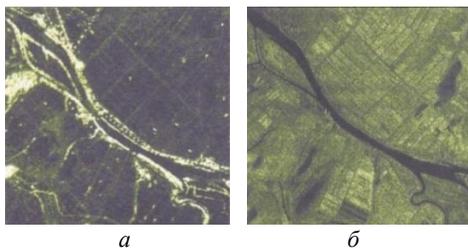


Рис. 2. Исходные радиолокационные изображения в диапазонах длин волн:  $a$  – 2,5 м;  $b$  – 4 см

Объединенное изображение приведено на рис. 3.



Рис. 3. Объединенное радиолокационное изображение

Экспериментальные результаты демонстрируют, что предложенный метод может обеспечить высокое качество объединенного изображения. Кроме того, предложенный метод является вычислительно эффективным, что делает его пригодным для реального применения.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Qu G., Zhang D., Yan P. Information measure for performance of image fusion. – 2002. – P. 313–317.
2. Goshtasby A.A., Nikolov S. Image fusion: Advances in the state of the art. – 2007. – P. 114–132.

## **ПОДСЕКЦИЯ 1.2**

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

*Председатель – Шостак А.С., проф. каф. КИПР, д.т.н.;*  
*зам. председателя – Озёркин Д.В., декан РКФ, к.т.н.*

УДК 537.3

#### **АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ НИТРИДА ГАЛЛИЯ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

*Д.А. Лужайцев, А.О. Туров, Ю.А. Миллер, магистранты каф. ФЭ;  
Э.О. Лужайцева, магистрант каф. ИФФ (ТГПУ);  
Д.С. Хохол, инженер НИИ СЭС*

*Научный руководитель А.С. Сальников, доцент каф. ФЭ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, danil.wow67@gmail.com*

Дан анализ основных параметров малошумящего усилителя, который спроектирован по технологии нитрида галлия с целью выявления влияния температуры на работу микросхемы.

**Ключевые слова:** малошумящий усилитель, коэффициент шума, температура окружающей среды, нитрид галлия.

На данном этапе развития электроники в области проектирования интегральных микросхем технология нитрида галлия имеет большую область использования. Это связано с тем, что гетероструктуры, изготовленные по данному технологическому процессу, имеют высокое значение выходной мощности, при этом температура саморазогрева устройства остаётся невысокой в сравнении с арсенидом галлия. Само же исследование, проведенное с помощью моделей 0,25 мкм, GaN, НЕМТ-транзисторов и с использованием САПР, направлено на оценку влияния температуры окружающей среды на рабочие параметры устройства.

В ходе проектирования была получена электрическая принципиальная схема, которая приведена на рис. 1.

Представленная схема на рис. 1 имеет в своём составе входной и выходной каскады транзисторов, а также содержит входную, выходную, межкаскадную согласующую цепь с цепью устойчивости выход-

ного каскада и разделительные конденсаторы в цепи питания и смещения усилителя для предотвращения низкочастотной генерации [1]. Смещение затвора МШУ производится с помощью одной контактной площадки за счёт делителя напряжения в схеме смещения.

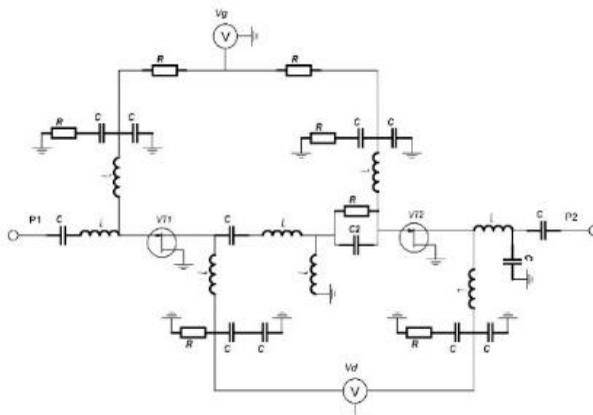


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема малошумящего усилителя

Спроектированный усилитель обладает параметрами, которые были смоделированы при различной температуре и которые представлены на рис. 2–5.

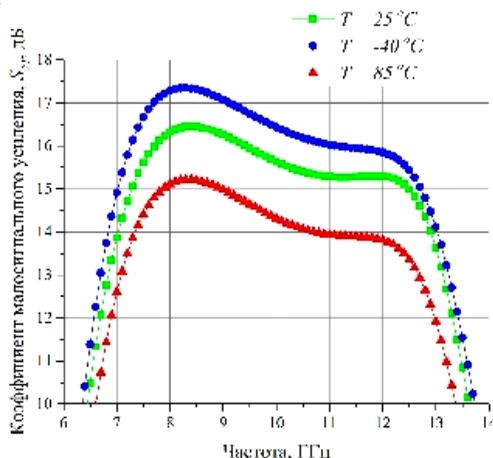


Рис. 2. Частотная зависимость малосигнального усиления

Как видно из зависимости на рис. 2, коэффициент усиления при нормальной температуре, в рабочем диапазоне частот 8–12 ГГц, имеет

значение более 15 дБ. При повышении температуры окружающей среды малосигнальное усиление падает. Это связано с тем, что при повышении температуры уменьшается подвижность носителей заряда. Также на данный параметр оказывает влияние изменение импеданса и рабочей точки транзисторов в обоих каскадах [2].

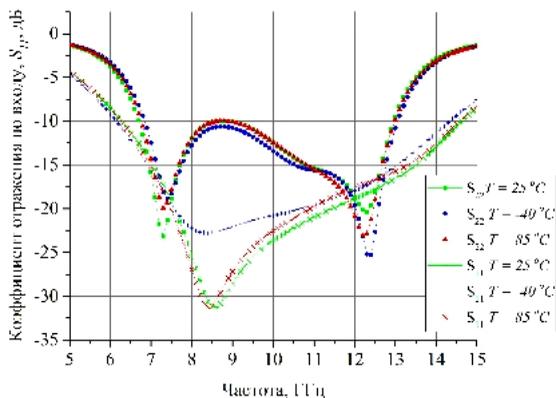


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента отражения

Зависимость на рис. 3 показывает, что в рабочем диапазоне частот 8–12 ГГц имеет значение коэффициент отражения по выходу менее  $-17$  дБ и менее  $-10$  дБ по входу, что свидетельствует о малом отражении по отношению к нормированному 50-омному сопротивлению. При изменении температуры окружающей среды заметного изменения в данном параметре не наблюдается. При понижении температуры коэффициент отражения по выходу возрастает, что связано с рассогласованием выходной цепи относительно импеданса транзистора. Характерный резонанс на частоте 8,5 ГГц исчезает.

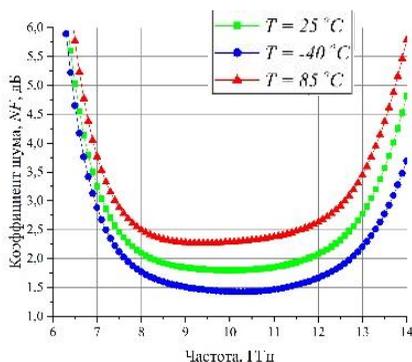


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента шума

Коэффициент шума, представленный на рис. 4. имеет значение менее 2 дБ во всем рабочем диапазоне при нормальной температуре окружающей среды. При этом при повышении температуры происходит увеличение коэффициента шума на 0,5 дБ. Это связано с изменением коэффициента шума во входном каскаде. Изменение коэффициента шума связано в первую очередь с увеличением собственных шумов, связанных с колебанием атомов в кристаллической решётке. Во вторую очередь влияет изменение рабочей точки при изменении температуры окружающей среды транзистора.

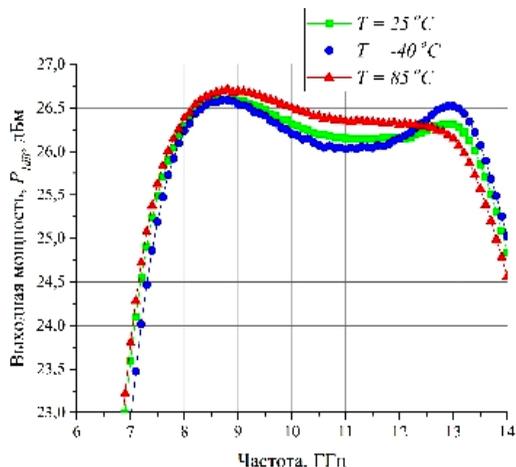


Рис. 5. Частотная зависимость выходной мощности

Выходная мощность, представленная рис. 5, имеет значение при нормальной температуре в диапазоне от 8 до 12 ГГц, значение выше 26 дБм. При увеличении температуры окружающей среды происходит незначительное изменение выходной мощности, связанное с изменением выходного импеданса транзистора.

Проводя анализ зависимостей, представленных на рис. 2–5, можно заключить, что при увеличении температуры окружающей среды основной параметр малошумящего усилителя – коэффициент шума увеличивается не более чем на 25%. Для уменьшения этого процесса необходимо производить термостабилизацию рабочей точки входного каскада транзистора [3]. Этого можно добиться, используя термозависимые элементы в составе интегральной микросхемы. Коэффициент усиления при увеличении температуры окружающей среды уменьшается более чем на 1 дБ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hek de A.P. Design, realisation and test of GaAs-based monolithic integrated X-bandhigh-power amplifiers / A.P. de Hek. – Eindhoven: TechnischeUniversiteit Eindhoven, 2002. – 323 p.
2. Сазонов Д.М. Устройства СВЧ: учеб. пособие / под ред. Д.М. Сазонова. – М.: Высш. школа, 1981. – 295 с.
3. Silva O.B. Design of High Linearity MMIC Power Amplifiers for Space. – Chalmers Reprosevice, Sweden, 2014. – 66 p.

УДК 669-1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОРИЕНТАЦИИ СЛОЁВ ПЕЧАТИ SLM-ТЕХНОЛОГИИ СПЛАВА ИНКОНЕЛЯ 718 НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

*Р.Ю. Подгородецкий, студент*

*Научный руководитель Н.Н. Кривин, доцент каф. КИПП, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. КИПП, romanpodgorodetsky@yandex.ru*

Селективное лазерное плавление (SLM) – это технология аддитивного производства, при которой с помощью лазера можно изготавливать детали со сложной геометрией и высокими механическими свойствами. Однако оптимальные технологические параметры SLM-процесса для металлических материалов сложно предсказать. Представлены результаты механических испытаний детали, изготовленной из Inconel 718 с помощью SLM-технологий с разной ориентацией слоев печати (горизонтальной и вертикальной).

**Ключевые слова:** аддитивное производство, SLM, термическая обработка.

Аддитивное производство является перспективным современным направлением, которое открывает новые возможности для создания металлических изделий самой разнообразной формы.

Наиболее широкое распространение в последние годы получила технология Metal Powder Laser Melting (Selective Laser Melting, Direct Metal Laser Sintering и др.) – лазерного плавления металлического порошка, которая позволяет быстро и с высокой точностью поэтапно изготавливать композитные изделия по компьютерной модели практически из любого металлического порошка [1].

Интенсивное развитие аддитивных технологий обусловлено рядом их преимуществ:

– возможностью получать тонкостенные детали, поскольку фракции применяемых порошков при 3D-принтинге, как правило, находятся в пределах 10–100 мкм;

- обеспечением высокого коэффициента использования металла и минимизацией отходов;
- отсутствием литейных дефектов в деталях;
- упрощением процесса производства деталей за счет уменьшения количества технологических переходов;
- исключением из техпроцесса изготовления технологической оснастки и дополнительного оборудования;
- снижением времени и трудоемкости изготовления.

Данная работа посвящена исследованию влияния ориентации слоев печати по отношению направления удара на механические свойства изделий (предел прочности  $\sigma_b$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное удлинение  $\delta_5$ ), а также на мягкость и пластичность слоев печати из никелевого сплава INCONEL 718, изготовленных по SLM-технологии [2, 3].

Уникальный состав Inconel 718 определяет повышенную прочностную и коррозионную стойкость в сочетании с простой обрабатываемостью и лёгкой свариваемостью. Среди его основных достоинств – неподверженность коррозионным повреждениям на участках сварных швов и большая прочность на разрыв при температурных режимах, достигающих 700 °С.

Все образцы для испытания (рис. 1) были напечатаны при помощи одного и того же режима печати, слоты были разложены на платформе в горизонтальном и вертикальном положении (рис. 2). Далее участки подвергались термической обработке. В рамках исследований термическая обработка (т.о.) отличалась условиями охлаждения после высокотемпературного нагрева: в воде (способ 2) и на воздухе (способ 1) (табл. 1).

Таблица 1

**Режимы термической обработки исследуемых образцов**

№	Режим
1	Выходной после печати (горизонтальный)
2	Режим 1: выдержка 1 ч при 980 °С, охлаждение на воздухе до температуры окружающей среды, выдержка 8 ч при 720 °С; охлаждение с печью до 620 °С, выдержка при 620 °С 8 ч (горизонтальный)
3	Режим 2: выдержка 1 ч при 980 °С, охлаждение в воде до температуры окружающей среды, выдержка 8 ч при 720 °С; охлаждение с печью до 620 °С, выдержка при 620 °С 8 ч (горизонтальный)
4	Режим 2: выдержка 1 ч при 980 °С, охлаждение в воде до температуры окружающей среды, выдержка 8 ч при 720 °С; охлаждение с печью до 620 °С, выдержка при 620 °С 8 ч (вертикальный)
5	Режим 1: выдержка 1 ч при 980 °С, охлаждение на воздухе до температуры окружающей среды, выдержка 8 ч при 720 °С; охлаждение с печью до 620 °С, выдержка при 620 °С 8 ч (вертикальный)



Рис. 1. Образец для испытания

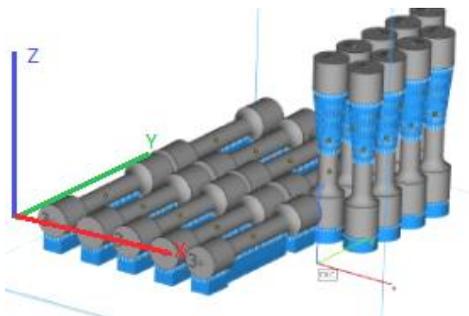


Рис. 2. Расположение образцов на платформе

Испытания на механические свойства проводились в соответствии с ISO 6892 на испытательной машине INSTRON.

Результаты эксперимента приведены в табл. 2. Их анализ показал, что после термообработки воздушным способом (с охлаждением на поверхности) предел сыпучести для вертикального среза по сравнению с горизонтальным срезом увеличился до 9%. В то же время пластичность для среза, распределенного горизонтально, выше (на 16 и 28% для среднего удлинения и среднего утолщения соответственно).

Таблица 2

**Результаты испытаний на растяжение испытанных соединений**

Маркировка	Способ охлаждения	Ориентация по оси Z	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\Psi$ , %
1	Без т.о.	Гор. 90°	1066,3	755,0	25,6	34,9
2	Воздушный	Гор. 90°	1394,4	1121,4	18,8	34,9
3	Водяной	Гор. 90°	1404,7	1153,9	14,0	18,6
4	Водяной	Верт. 0°	1414,9	1185,6	12,6	13,7
5	Воздушный	Верт. 0°	1517,2	1181,9	15,7	25,1
ASTM B637	После т.о.		$\geq 1275$	$\geq 1043$	$\geq 12$	$\geq 15$

В состоянии после термической обработки водяным способом охлаждения показатели мягкости вертикально и горизонтально сформированных слоев очень близки (разница не превышает 3%). Показа-

тели пластичности для горизонтального положения слоя при ударе увеличились на 10 и 30% для среднего удлинения и среднего утолщения соответственно.

Также было изучено влияние положения надреза при ударе на механические свойства после термообработки. Было установлено, что показатели мягкости несколько выше для вертикальных надрезов (до 9%), а пластичность в среднем на 20% ниже, чем для горизонтальных надрезов.

### **Выводы**

1. Установлено, что использование термической обработки позволяет повысить комплекс механических свойств инконеля 718, полученного по SLM-технологии. После обработки наблюдается рост предела прочности, предела текучести до следующих значений:  $\sigma_b = 1517,2$  МПа;  $\sigma_T = 1185,6$  МПа.

2. Показана взаимосвязь параметров печати и микроструктуры тела, что обуславливает необходимость разработки обоснованных режимов процесса SLM для изделий различного назначения. Установлено, что режимы печати детали должны задаваться в зависимости от геометрии изделия (угол наклона поверхности, толщина стенки, размер детали).

3. Установлено, что ориентация образцов, производимых по SLM-технологии, оказывает меньшее влияние на свойства прочности (до 9%). Показатели пластичности для образцов, напечатанных в горизонтальном и вертикальном положении, могут отличаться до 28%.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Аджамский С.В. Использование SLM-технологии в деталях и узлах авиационно-космического назначения / С.В. Аджамский, А.А. Кононенко, Р.В. Подольский // 11 Всеукраїнська конф. молодих вчених «Молоді вчені – 2020».

2. Аджамский С.В. Исследование влияния режимов SLM-процесса на качество в области контура изделий / С.В. Аджамский, А.А. Кононенко, Р.В. Подольский // Міжнародна конф. «Університетська наука – 2020» [Электронный ресурс].

3. Аджамский С.В. Симуляция влияния остаточных напряжений и параметров SLM-технологии на формирование области границ изделия из жаропрочного никелевого сплава INCONEL 718 / С.В. Аджамский, А.А. Кононенко, Р.В. Подольский // Ministry of Education and Science of Ukraine The National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 17–19 March, 2020. – 2020. – № 1. – С. 4–6. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2020.01.00.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ВСТАВОК ПЛАВКИХ

*А.Е. Целовальникова, аспирант*

*Научный руководитель Н.Н. Кривин, доцент каф. КИПР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. КИПР, tselovalnikova.a.05@e.tusur.ru*

Предложена методика для совершенствования технологии изготовления некоторых типов плавких вставок с помощью напыления металлургического слоя на поверхность керамической основы.

**Ключевые слова:** предохранитель, вставка плавкая, «горячая» мишень, металлизация.

На сегодняшний день в космической технике наблюдается устойчивая тенденция к созданию малых и сверхмалых космических аппаратов (КА). Однако одновременно с этим возрастают требования к энерговооруженности КА, что определяет необходимость повышения надежности бортовой радиоаппаратуры. Уменьшение массогабаритных показателей электрорадиоизделий (ЭРИ) при одновременном увеличении электрических нагрузок приводит к необходимости применения более прочных и легких материалов для корпусов и новых технологических процессов их изготовления.

Одним из распространенных ЭРИ, применяемых в радиоэлектронной аппаратуре КА с целью защиты электрических цепей от перегрузок, являются предохранители или вставки плавкие. Решение сформулированной выше задачи приводит к необходимости использования керамики в качестве материала корпуса вставок плавких.

При изготовлении ряда некоторых электронных приборов в качестве основного метода соединения изделий к токопроводящим элементам широко используются различные способы пайки. При использовании керамики в качестве материала корпуса предохранителей для реализации возможности их соединения с токопроводящими элементами возникает необходимость формирования металлического слоя на керамической поверхности. Металлизацию керамики осуществляют нанесением на ее поверхность тонкой пленки (как правило, используется никель).

Как правило, технологический процесс металлизации отдельных участков керамического изделия предусматривает следующие операции:

1. Создание металлического слоя на поверхности изделия в том месте, где будет электрод, соединяющий изделие с электрической цепью.

2. Создание металлокерамической конструкции изделия посредством соединения его керамической и металлической частей методом пайки. При этом соединение должно удовлетворять требованию прочности.

Экспериментально показано [1], что перспективен для распыления никеля магнетронный диод с «горячей мишенью». В результате бомбардировки ионами плазмы материал мишени нагревается выше точки Кюри (627 К). В этом случае мишень становится парамагнитной. Возникает дополнительный поток энергии на подложку за счет теплового излучения нагретой мишени, что приводит к созданию более однородного и плотного распределения металлизировующего материала по керамической поверхности.

Описанный метод формирования металлизированного слоя на керамической поверхности (рис. 1) был опробован при изготовлении экспериментальной партии вставок плавких (рис. 2). Эксперимент показал, что использование рассмотренного способа распыления никеля магнетронным диодом с «горячей мишенью» приводит к ускорению технологического процесса лужения и улучшению качества контактных поверхностей вставок плавких (отсутствие посторонних включений, необлуженных частей и волнистости припоя).

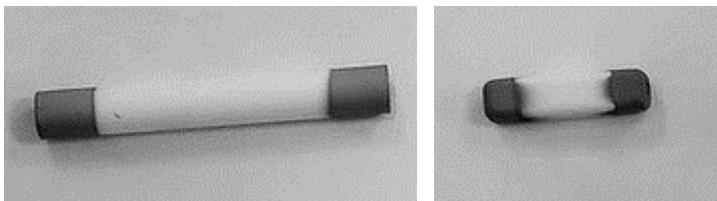


Рис. 1. Керамические основания с нанесенным металлическим слоем никеля

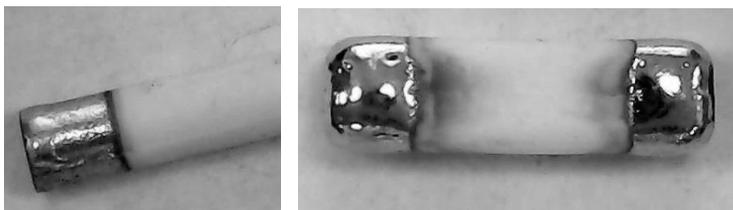


Рис. 2. Керамическое основание с нанесенным металлическим слоем после операции лужения

Полученные результаты дают основание рекомендовать данную методику для внедрения в технологии изготовления некоторых типов вставок, выпускаемых предприятием АО «НПЦ «Полус».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Целовальникова А.Е., Сиделёв Д.В. Влияние типа магнетронного диода на свойства никелевых плёнок // XVI Междунар. конф.я студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук». – Томск, 2019.

УДК 51-74

**ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА ТОКА  
В НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ КОММУТАЦИОННОГО НЕМТ**  
*А.О. Туров, Д.А. Лужайцев, Ю.А. Миллер, магистранты каф. ФЭ;  
Э.О. Лужайцева, магистрант каф. ИФФ (ТГПУ)*  
*Научный руководитель А.С. Сальников, доцент каф. ФЭ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, t.artem.o@mail.ru*

Описана реализация источника тока модели switch НЕМТ, а именно изложены основные особенности, которых стоит придерживаться при построении модели коммутационного транзистора. Приведены сравнительные характеристики реальных транзисторов и модели.

**Ключевые слова:** транзистор, switch-транзистор, коммутационный транзистор, нелинейная модель, источник тока.

В данный момент требования точности, предъявляемые к проектированию МИС, сводятся к таким же требованиям и к моделям нелинейных и линейных элементов. Использование готовых моделей, например транзисторов, не всегда удовлетворяет должной точности. Как правило, это связано моделированием «внутренних» параметров транзистора. Для реализации более точной модели необходимо построение источника тока, управляемого напряжением, который, в свою очередь, будет описывать коммутационные свойства транзистора. Преимущества построения источника собственноручно в отличие от уже существующих – это возможность добавления коэффициентов, которые, возможно, не будут обоснованы физикой, но будут хорошо описываться математикой и сделают модель точнее. Притом из существующих в открытом доступе моделей в коммутационном режиме включения ни одна не моделирует мощностные характеристики.

Сложность построения источника тока, управляемого напряжением, складывается из того, что необходимо задание его параметров в виде уравнений с условиями на языке САПР.

Построение источника начинается с построения его эквивалентной схемы. Необходим линейный источник напряжения, управляемый напряжением, а именно источник с присутствием настройки времен-

ной задержки, связанной с усилением напряжения, которая, в свою очередь, является аналогией времени пролета заряда через канал (VCVS), во многих современных САПР такой источник присутствует в стандартной библиотеке. Еще одним основным элементом для эквивалентной схемы является символьный элемент, способный генерировать явное уравнение, которое описывает ток порта в терминах напряжения (SDD2P, где 2 – количество портов).

После выбора основных элементов можно приступить к сбору эквивалентной схемы с учетом особенностей, определенных САПР. Схема в общем виде представлена на рис. 1.

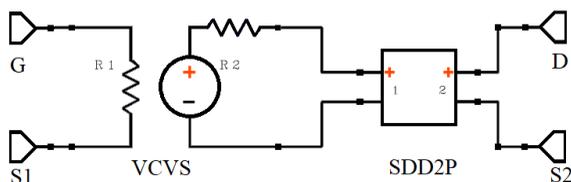


Рис. 1. Эквивалентная схема источника

На схеме отображены порты ( $G$ ,  $D$ ,  $S1$ ,  $S2$ ) для дальнейшего вывода подсхемы и проведения следующих этапов моделирования. Для удобства порты названы согласно областям реального транзистора:  $G$  – затвор,  $D$  – сток,  $S1$ ,  $S2$  – выводы истока. Временная задержка, связанная с усилением тока, подбирается обычно эмпирически.

Математика для реализации источника была взята из работ Коллета [1], и моделей Ангелова [2]. Основное уравнение тока стока-истока записывается в виде

$$I_{ds} = I_{pk} \operatorname{dhypr}[V_{dsn} + A \cdot V_{dsn}^3] \cdot V_{gsn}, \quad (1)$$

где  $I_{pk}$  – дисперсия в токе стока-истока GaAs НЕМТ подтверждается наблюдением, что выходная проводимость и крутизна за пределами некоторой частоты перехода выше, чем та, которая выводится из измерений постоянного тока [3, 4]. Функция  $\operatorname{dhypr}$  схожа с функцией гиперболического тангенса  $\tanh(x)$  и хорошо описывает зависимости напряжения затвора и его производные, обычно используется в симуляторах гармонического баланса. Отличительной и важной особенностью данной функции является описание обратных ВАХ транзистора;  $V_{dsn} = V_{dsi} - V_{pk}$ . Замена производится для упрощения дальнейшей настройки, т.к.  $V_{pk}$  находится эмпирически.  $V_{dsi} = V_{gs}$  – напряжение, снимаемое с элемента со второго порта SDD2P.

Исходя из формул, видно, что появляются переменные, которые описывают поведение транзистора. В приведенных формулах присут-

ствуют поправочные коэффициенты, диапазон изменения этих коэффициентов при настройке лежит в пределах единицы.

Финальное уравнение тока сток-исток записывается в виде

$$I_{ds} = I_{pk} \cdot \frac{F_d}{F_g} \cdot V_{gsn} \cdot \quad (2)$$

Исходя из выведенных условий, можно приступить к настройке вольт-амперных характеристик. Проведем также сравнение ВАХ, смоделированных методом, описанным в работах Ангелова [1], и методом, изложенным в работах Коллета [2]. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

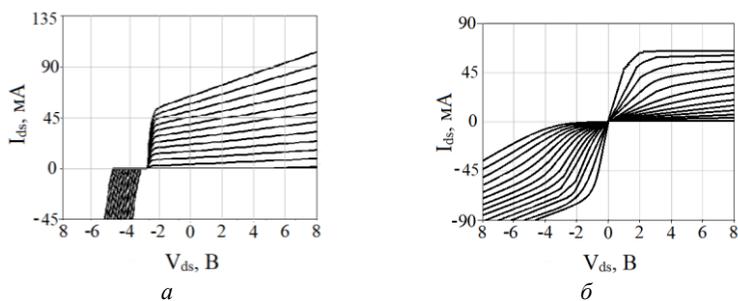


Рис. 2. Результаты моделирования в работах: *a* – Ангелова; *б* – Коллета

Как видно из графиков, вариант, описанный в данной статье, имеет лучшее схождение с теорией, особенно в области обратных ВАХ. Данной области необходимо уделять особое внимание ввиду двунаправленности устройства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Callet G. A new nonlinear HEMT model for AlGaIn/GaN switch applications // International journal of microwave and wireless technologies. – 2010. – Vol. 2, № 3-4. – P. 283.
2. Angelov I. New empirical nonlinear model for HEMT and MESFET devices / I. Angelov, H. Zirath, N. Rorsman // IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 05/2002. – Dec. 1992. – Vol. 40. – P. 2258–2266.
3. Aaen P. Modeling and Characterization of RF and Microwave power FETs / P. Aaen, J. Pla, J. Wood. – Cambridge University Press, 2007.
4. An overview of microwave component requirements for future space applications / A.R. Barnes, A. Boetti, L. Marchand et al. // Proc. 13th GAAS Symposium. – 2005. – P. 5–12.

## РАЗРАБОТКА АВТОНОМНОГО СЧЕТЧИКА ВРЕМЕНИ НАРАБОТКИ

*В.О. Мартьянов, студент*

*Научный руководитель Н.Н. Кривин, доцент каф. КИПР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. КИПР, exprav2@mail.ru*

Приводится описание технического решения разработанного автономного счетчика времени наработки. Обосновывается выбор предлагаемых проектных решений.

**Ключевые слова:** автономный счетчик времени наработки, лабораторные испытания, диапазон входного напряжения, точность измерения.

Счетчики времени наработки предназначены для учета времени работы оборудования и считают количество рабочих часов, начиная с момента включения счетчика до момента его выключения. Причем включение и отключение счетчика происходит синхронно с включением источника питания и его выключением.

Подсчет количества отработанных часов имеет большое значение для контроля оставшегося ресурса оборудования и используется для своевременного проведения ремонта и обслуживания механизмов и машин.

Известные решения счетчиков наработки, сочетающие в себе механические и электронные части, имеют высокую погрешность измерения и не обладают автономностью [1].

Целью работы является разработка электронного автономного счетчика времени наработки, обладающего высокой точностью измерений.

Структурная схема счетчика времени наработки приведена на рис. 1.

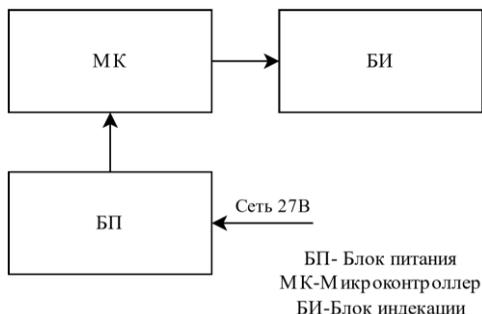


Рис. 1. Структурная схема автономного счетчика времени наработки

Переход от электромеханического принципа действия к электрическому способствует повышению надежности проектируемого устройства и улучшениям массогабаритных показателей.

По предварительной структурной схеме был спроектирован и изготовлен макет устройства счетчика времени наработки.

Далее были проведены лабораторные испытания [2] с целью выявления и подтверждения характеристик. В ходе лабораторных испытаний были выполнены следующие задачи: проверка диапазона входного напряжения, проверка точности измерения времени, проверка записи показаний счетчика в память.

Проверка диапазона входного напряжения проводилась для напряжений источника питания 20, 27, 34 В.

Напряжение 27 В является номинальным для источника питания. При этом значении входного напряжения – выходное составило 4,85 В.

При напряжении источника питания 20 В выходное напряжение составило 4,72 В. Выходное напряжение ИП является питающим для микросхем ИПВ72А1-4/5х7К и 1158ЕН3.3ВТ платы счетчика времени. Диапазон входного напряжения для ИПВ72А1-4/5х7К составляет от 4,5 до 5,5 В, а для 1158ЕН3.3ВТ – от 4,3 до 26 В. Таким образом, значение напряжения питания является достаточным для работы устройства.

При напряжении источника питания 34 В выходное напряжение составляет 4,85 В и соответствует таковому при номинальном входном для напряжения источника питания 27 В.

Работоспособность устройства в заданном диапазоне входного напряжения сохраняется полностью.

Индикация производится посредством 2 последовательно соединенных индикаторов ИПВ72А1-4/5х7К, которые являются матричными индикаторами красного свечения с размером одного разряда 2,6×4,2 мм. Суммарная сумма разрядов составила 8, суммарная длина индикатора 37,5 мм.

Эксперимент, направленный на проверку точности измерения времени, зафиксировал отклонение времени за 4 ч в секундомере от показателей счетчика времени наработки в десятые доли секунды, что характерно для методологической погрешности данного эксперимента. Пределы допускаемой относительной погрешности измерений в нормальных климатических условиях эксплуатации [3] для электромеханических счетчиков времени составляет 0,2%, что в сумме за 4 ч дало бы отклонение в 28 с.

Проверка записи показаний счетчика в память подтвердила способность устройства сохранять показания при выключении питания.

В качестве микроконтроллера выбрана микросхема 1986BE92У.

Установка на индикаторе времени в 999999 ч 59 мин в интерфейсе программы (рис. 2) подтвердила максимальную емкость счетчика. Через минуту после установки максимально возможного времени счет обнулится.

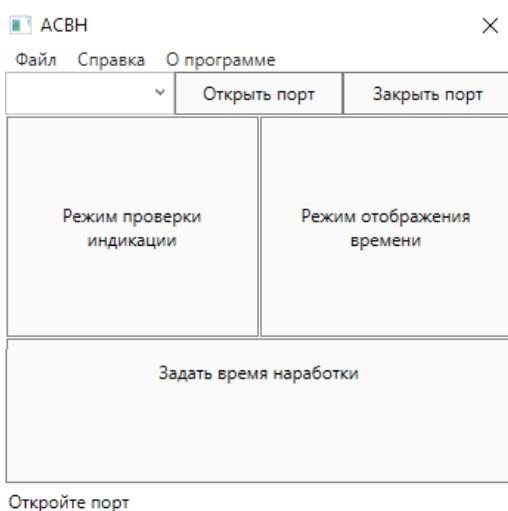


Рис. 2. Интерфейс программы для установки времени

Таким образом, разработан электронный счетчик времени наработки, обладающий высокой точностью измерений. Лабораторные испытания подтвердили высокую точность измерений, номинальный диапазон входного напряжения и способность счетчика сохранять показания при выключении источника питания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Механический счетчик времени наработки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lemzspb.ru/mekhanicheskiy-schetchik-vremeni-narabotki/> (дата обращения: 08.03.2022).
2. Абомелик Т.П. Методы и средства испытаний: метод. указ. к лаб. работам. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 40 с.
3. ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Изменение № 5 внесено изготовителем базы данных по тексту ИУС № 2, 2013 г.

## РАЗРАБОТКА КОММУТАТОРА ПИТАНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОГО КОМПЛЕКСА ЗАПУСКА МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ПОВЫШЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ЗАЩИТЫ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

*А.И. Окуневский, студент*

*Научный руководитель Н.Н. Кривин, доцент каф. КИПР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. КИПР, areant1@yandex.ru*

Предложена конструкция коммутатора электрического питания для использования в сетях наземного комплекса запуска малых космических аппаратов. Конструкция позволяет производить коммутацию питания с переменным напряжением и током.

**Ключевые слова:** космос, малый космический аппарат, коммутатор питания, наземный комплекс, прибор распределения.

В настоящее время освоение космоса является крайне важным этапом в истории развития человечества, создание космических аппаратов требует серьёзных усилий, знаний и умений. Но ни один из космических аппаратов не сможет выйти на орбиту без помощи человека, без помощи запуска с наземного комплекса. В состав наземного комплекса для запуска малого космического аппарата (МКА) входит множество радиоэлектронных устройств (РЭУ), одним из которых является прибор распределения (ПР), включающий в себя коммутатор питания (КП).

КП предназначен для коммутации входного напряжения прибора распределения на один или несколько его выходов, а также ограничение пускового тока заряда входных емкостей ПР. Главная функция КП – распределение питания между устройствами. На рис. 1 представлен прототип КП фирмы АО «НПЦ «Полус» с видимой сборкой реле.

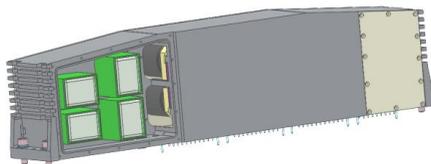


Рис. 1. Вариант установки реле РЭП33-200 непосредственно на корпус коммутатора питания

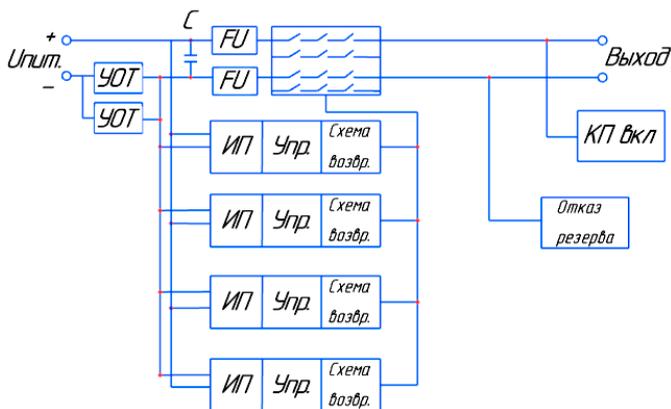
Конструкция данного КП имеет недочёты. Об этом свидетельствует отказ работоспособности устройства, наступивший в результате его испытаний на механические нагрузки, в ходе которых, согласно

ТУ на прибор, сборка реле РЭП33-200 подверглась ускорениям вплоть до 350g.

Доработка коммутатора питания без изменения технических характеристик самого прибора необходима, поскольку поможет улучшить технико-экономические показатели запуска МКА.

Далее рассмотрим принцип работы КП подробнее. На рис. 2 представлена структурная схема КП.

При подаче входного напряжения ПР пусковые токи заряда емкостей проходят через устройства ограничения тока каждого КП.



*ИП - источник питания,*

*Упр. - устройство управления,*

*Схема возвр. - схема возврата в исходное состояние,*

*УОТ - устройство ограничения тока,*

*C - входные емкости, расположенные в ПР.*

Рис. 2. Структурная схема КП

Для того чтобы подать на выход ПР напряжение, необходимо коммутировать КП с помощью реле РЭП33-200. Далее, чтобы получить необходимое напряжение управления обмотками реле в 27 В, в схему КП введен стабилизатор напряжения (входит в состав устройства управления). Коммутация реле осуществляется с помощью устройства управления. При снижении входного напряжения до уровня  $(22 \pm 2)$  В все КП должны переводиться в разомкнутое состояние при помощи схемы возврата. КП имеет возможность производить самодиагностику и имеет два сигнала на выходе: «КП включен» при наличии напряжения на выходе КП и «Отказ резерва» при несоответствии положения контактов любого реле КП поданной команде.

Далее рассмотрим методы защиты КП от механических воздействий при испытаниях и подведем итоги по разработанному устройству.

Доработанная версия КП обладает следующими улучшениями: для монтажа сборки реле была разработана отдельная стальная пластина и добавлены 4 амортизатора из смеси резиновой (рис. 3), с помощью которых производится установка в корпус КП. Для дополнительной защиты на внутренней стороне крышки корпуса КП, закрывающей сборку реле, установлена резиновая прокладка для смягчения ударов от сборки реле при испытаниях. Данные доработки позволили улучшить показатели виброустойчивости и ударопрочности (показатель ударопрочности достигает  $350g$ ), сохранив остальные показатели КП неизменными.

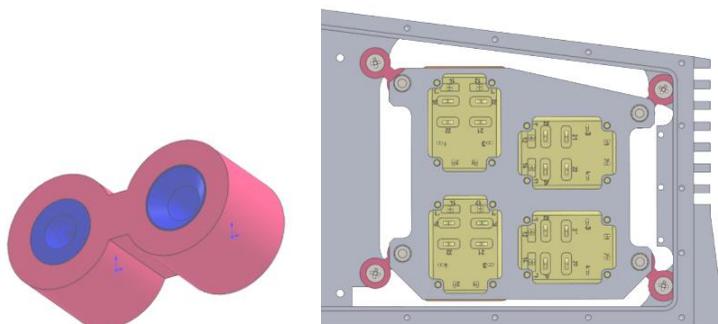


Рис. 3. Амортизатор и его установка в корпусе КП

Подводя итог, можно сказать о том, что была разработана конструкция прототипа устройства, осуществляющего коммутацию питания с переменным напряжением и током в сетях наземного комплекса запуска малых космических аппаратов, стойкая к механическим воздействиям.

Ключевое отличие разработанного устройства – низкая себестоимость, обусловленная грамотным подбором материалов и широкими производственными мощностями предприятия АО «НПЦ «Полнос», а также улучшенные показатели защиты от механических воздействий.

Дальнейшее развитие КП будет проходить в направлении комплексной миниатюризации устройства, а именно: будет пересмотрена схема электрическая принципиальная в соответствии с заменой компонентов элементной базы на более современные SMD-аналоги. Данные операции будут необходимы для уменьшения массогабаритных размеров устройства, что также позволит снизить себестоимость производства устройства.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Костюкевич А.А. Конструирование и технология электронных схем: учеб.-метод. пособие / А.А. Костюкевич, В.Ф. Алексеев, В.М. Бондарик, А.П. Достанко. – Минск: БГУИР, 2011. – 119 с.
2. Внешние факторы, влияющие на работоспособность РЭА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://digitrode.ru/articles/1572-vneshnie-factory-vliyayuschie-na-rabotosposobnost-rea.html> (дата обращения: 05.03.2022).
3. Озеркин Д.В. Системная технология инженерного проектирования РЭС в дипломировании: учеб. пособие / Д.В. Озеркин, В.П. Алексеев. – Томск: ТУСУР, 2012. – 103 с.

УДК 621.396.96

**АНАЛИЗ ВОПРОСА ПРИМЕНИМОСТИ СОСТОЯНИЯ  
ЗАКРУЧЕННОСТИ РАДИОВОЛН В КАЧЕСТВЕ  
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ИНФОРМАТИВНОГО ПРИЗНАКА  
В ЗАДАЧАХ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИИ**  
*Д.Е. Понамарев, аспирант; Н.Н. Кривин, доцент каф. КИПР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. КИПР, dmitri4ponamarev@gmail.com,  
freeman46@yandex.ru*

Рассмотрены вопросы, связанные с возможностью применения свойства закрученности радиоволн в поляризационной радиолокации. Описана проблемная ситуация, связанная с отсутствием научного задела по данной тематике. Приведены научная и прикладная актуальности данной темы как принципиально нового направления в радиолокации.

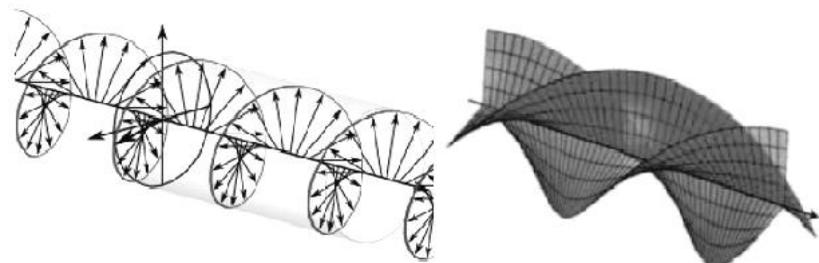
**Ключевые слова:** поляризация, закрученность радиоволн, информативный признак, поляризационная радиолокация, волновой фронт, орбитальный угловой момент радиоволны, однородная среда, неоднородная среда.

Современная поляризационная радиолокация, работающая с плоскими электромагнитными волнами (ЭМВ) и использующая состояние поляризации ЭМВ в качестве информативного признака, имеет ограничения в решении задач, связанных с обнаружением и идентификацией радиолокационных объектов особых классов в условиях сильных помеховых отражений.

Например, не представляется возможным различать малоразмерные шарообразные или плоские объекты на фоне подстилающей поверхности, которая по поляризационным свойствам близка к классу поляризационно-изотропных объектов, или в объеме пространственно распределённых объектов типа облаков гидрометеоров. В случае зон-

дирования метеобразований при некоторых интенсивностях осадков и длин трасс распространения сигналов возможно завышение или занижение степени опасности, что для авиации может являться критическим фактором, способным вызывать не только большие экономические издержки, но и авиакатастрофы, что подробно было рассмотрено в работах [1, 2].

Существует еще одно свойство ЭМВ, которое называется закрученностью или орбитальным угловым моментом ЭМВ. Если поляризация связана с собственным вращением электромагнитной волны, то орбитальный угловой момент связан с закручиванием электромагнитной волны в пространстве (рис. 1). При этом такая волна может иметь поляризацию любого вида.



Волна с круговой поляризацией

Закрученная волна

Рис. 1. Графическое представление различия между поляризацией и закрученностью ЭМВ

Вариант исполнения антенны для получения закрученного сигнала приведён на рис. 2.



Рис. 2. Вариант исполнения антенны для получения закрученного сигнала

Как показали исследования, проведенные с ЭМВ оптического диапазона, свойство закрученности обладает существенным информационным потенциалом. Единая электромагнитная природа оптического и радиоволнового излучений позволила предположить, что данные особенности будут иметь место и в радиоволновом диапазоне.

Недавние зарубежные исследования подтвердили эту возможность [3–6]. Например, в вопросе обеспечения радиосвязи использование закрученности электромагнитной волны в качестве дополнительного информационного признака позволяет реализовать, в перспективе, почти бесконечное количество каналов в заданной фиксированной полосе пропускания, даже без использования поляризации. Это открывает перспективный путь для разработки новых протоколов радиосвязи, которые могут решить проблему перенасыщенности радиодиапазона. В приведённых выше работах также имеются данные успешных экспериментов, заключающихся в передаче закрученных сигналов из точки А в точку Б.

Однако проработка вопроса применимости закрученности ЭМВ в решении задач радиолокации в настоящее время находится на начальном этапе [7]. В частности, проблемная ситуация заключается в том, что на сегодняшний день отсутствуют:

- подходы к применению закрученности ЭМВ в комбинации со свойством поляризации ЭМВ;
- принципы выбора зондирующих сигналов для формирования закрученных ЭМВ с управляемым поляризационным состоянием;
- методы и способы пространственного формирования и приема закрученных ЭМВ с помощью антенных систем;
- математические модели, описывающие процессы распространения закрученных ЭМВ через разные типы сред;
- математические модели, описывающие процессы рассеяния закрученных ЭМВ разными типами радиолокационных объектов и сред;
- алгоритмы обработки и интерпретации рассеянных и принятых закрученных ЭМВ.

Таким образом, предполагаемая научная актуальность проблемы заключается в дальнейшем развитии и расширении теории радиолокации, в частности, теории поляризационной радиолокации, на область использования закрученных ЭМВ. Другими словами, это позволит развить принципиально новое направление в радиолокации. Предполагаемая прикладная актуальность проблемы заключается в разработке нового типа радиолокационных систем, в частности, их программно-аппаратных комплексов и элементов: антенных систем, систем

обработки и отображения информации и т.п., позволяющих обеспечить предлагаемые решения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Масалов Е.В., Понамарев Д.Е. Анализ погрешности при оценке модифицированной дифференциальной радиолокационной отражаемости в случае зондирования неоднородного метеообразования // Сб. избран. статей научной сессии ТУСУРа. Томск, 22–24 мая 2019 г.: в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С. 30–33.

2. Масалов Е.В., Кривин Н.Н., Понамарев Д.Е. Точностные характеристики оценки модифицированной дифференциальной радиолокационной отражаемости при дистанционном зондировании неоднородного метеообразования // Доклады ТУСУР. – 2019. – № 4 (22). – С. 19–25.

3. Tamburini F., Mari E., Sponselli A., Thid'e B., Bianchini A., Romanato F. Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test // New Journal of Physics. – 2012. – Vol. 14. – 17 p.

4. Kish L.B., Nevels R.D. Twisted Radio Waves and Twisted Thermodynamics // PLOS ONE. – 2013. – Vol. 8. – 2 p.

5. Thid'e B., Then H., Sjöholm J., Palmer K., Bergman J., Carozzi T.D., Istomin Ya.N., Ibragimov N.H., Khamitova R. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain // Phys. Rev. Lett. – 2009. – 4 p.

6. Yan Yan, Guodong Xie, Martin P.J. Lavery, Hao Huang, Nisar Ahmed, Changjing Bao, Yongxiong Ren, Yinwen Cao, Long Li, Zhe Zhao, Andreas F. Molisch, Moshe Tur, Miles J. Padgett & Alan E. Willner | High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing // Nature Communications. – 2014. – 9 p.

7. Kang Liu, Yue Gao, Xiang Li, and Yongqiang Cheng. Target scattering characteristics for OAM-based radar // AIP Advances. – 2017. – 14 p.

УДК 621.317.441

### РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА СКАНИРОВАНИЯ МЕСТНОСТИ НА НАЛИЧИЕ МЕТАЛЛОВ

*А.В. Капушак, К.Д. Качанов, А.Н. Коновалова,  
Г.Э. Родионов, Д.Ю. Семенов, М.Е. Хохленков, студенты  
г. Томск, НИ ТПУ*

Разработано устройство для сканирования местности на наличие металлов, проведено проектирование печатной платы для металлоискателя, написано программное обеспечение. Экспериментально протестированы характеристики устройства. Проведен сравнительный анализ с аналогами, представленными на рынке.

**Ключевые слова:** металлоискатель, контроллер, GPS-модуль, SD-карта, координаты.

На сегодняшний день рынок металлоискателей довольно широк. В основном они представляют собой поисковую катушку, закрепленную на штанге с держателем для руки. Такой вид устройств предполагает, что переносить его будет пользователь. Металлоискателей, которые могли бы перемещаться без помощи пользователя, практически нет.

Также представленные на рынке металлоискатели не имеют возможности сохранять координаты места, где был найден металл. Хотя такая функция могла бы быть очень полезной, например, при исследовании обширных территорий, на которых предположительно находится много металлов. Поэтому, проанализировав рынок, было принято решение создать устройство для поиска металлов, которое могло бы самостоятельно передвигаться по некоторой площадке, с функцией записи координат места нахождения на SD-карту.

Основу устройства составляет металлоискатель, собранный для платы Arduino по схеме (рис. 1) [1].

Схема состоит из задающего генератора на биполярном транзисторе BC547. Частота данного генератора зависит от параметров катушки индуктивности. При внесении в поле катушки металла меняется её индуктивность. Вследствие этого меняется частота колебания контура [2]. Плата Arduino фиксирует изменение частоты работы контура и сохраняет в память данные, полученные в данный момент с модуля GPS.

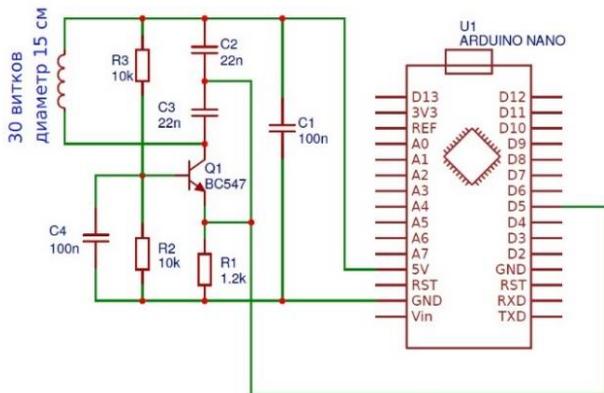


Рис. 1. Схема металлоискателя электрическая принципиальная

Металлоискатель запускается в работу при подключении питания с помощью кнопки на корпусе машинки.

Собранный металлоискатель закрепляется на корпусе машинки с помощью специально разработанного и напечатанного на 3D-прин-

тере подиума. Подиум устанавливается на переднюю часть радиоуправляемой машины (рис. 2).



Рис. 2. Изображение устройства с подиумом для крепления металлоискателя

Собранное устройство управляется оператором с помощью пульта на радиуправлении.

После сборки металлоискатель был проверен с помощью осциллографа. На осциллографе были проверены изменения частот и амплитуды на динамике металлоискателя при внесении в него металла. На рис. 3 изображен сигнал, полученный при обнаружении металла. На рис. 4 – металл не обнаружен.

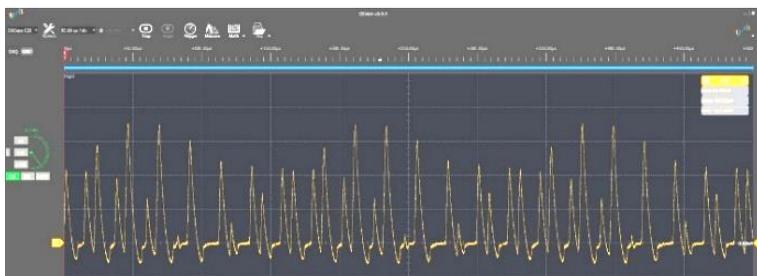


Рис. 3. Изображение сигнала, полученного на осциллографе, при проверке металлоискателя (металл обнаружен)

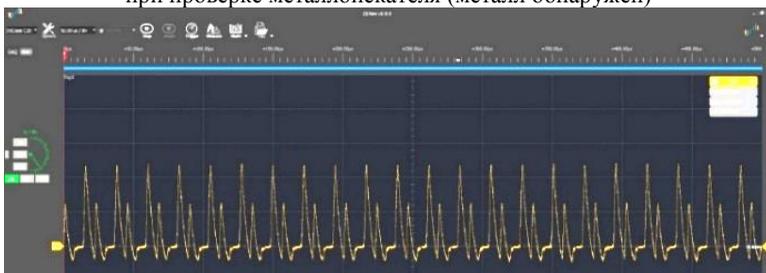


Рис. 4. Изображение сигнала, полученного на осциллографе, при проверке металлоискателя (металл не обнаружен)

Сигнал металлоискателя был выпрямлен через диод для того, чтобы с помощью Arduino можно было обнаружить изменение сигнала.

В результате проведенных экспериментов подтверждена работоспособность устройства и определены его основные характеристики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: пер. с англ. –2-е. изд. – М.: БИНОМ, 2014. – 704 с.

2. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника: учеб. пособие для приборостроительных специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1991.

УДК 004.942

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ БАЗОВЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВОЙ РАДИОАППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО КРИТЕРИЮ ТЕПЛООБМЕНА**

*А.А. Рябинин, аспирант; Н.Н. Кривин, доцент. каф. КИПР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. КИПР, [anton.a.riabinin@tusur.ru](mailto:anton.a.riabinin@tusur.ru),  
[nikolai.n.krivin@tusur.ru](mailto:nikolai.n.krivin@tusur.ru)*

Анализируется понятие цифровых двойников, рассматриваются примеры применения концепции цифровых двойников для решения оптимизационных задач, формулируется проблема исследования и осуществляется формализованная постановка задачи исследования.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, базовые несущие конструкции, бортовая радиоаппаратура, космические аппараты, критерий теплообмена.

Космические аппараты (КА) эксплуатируются в сложных и жестких условиях, одним из основных факторов которых является сильное температурное воздействие на КА. Поэтому для обеспечения работоспособности бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) при определенных режимах эксплуатации требуется интенсивное теплоотведение. Эта задача связана с выбором параметров базовой несущей конструкции бортовой РЭА (БНК БРЭА). Для разных классов КА она может решаться по-разному, что затрудняет поиск общего подхода.

Таким образом, проблема заключается в необходимости решения задачи оптимизации БНК БРЭА КА по критериям тепловых режимов с целью обеспечения интенсивного теплоотвода в бортовой РЭА.

Рост цифровизации стадий жизненного цикла электроники привел к формированию концепции цифровых двойников.

Цифровой двойник (ЦД, Digital Twin, DT) – это технология проектирования, в основе которой лежит разработка и использование сложных мультидисциплинарных математических моделей, которые описываются трехмерными нелинейными нестационарными дифференциальными уравнениями в частных производных и являются высокоадекватными поведению реальных материалов, объектов (систем, конструкций и т.п.) в разных условиях эксплуатации; различным технологическим процессам, с помощью которых создаются реальные материалы и объекты (изделия, продукты и т.п.) [1]; система из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием и (или) его составными частями (рис. 1) [2].



Рис. 1. К определению цифрового двойника [1]

Датчики, встроенные в технический объект, в режиме реального времени собирают данные о его физико-техническом состоянии и отправляются ЦД. Так уточняется цифровая модель объекта, которая накапливает информацию о его онтологии и учитывает все изменения его характеристик и параметров. Уточнение модели объекта повышает адекватность прогнозирования и описания его поведения.

В качестве примера на рис. 2 показаны результаты редизайна кронштейна для КА под аддитивное производство на основе топологической оптимизации, по итогам которой удалось на 43% снизить массу изделия по сравнению с прототипом [1]. Стоит отметить схожесть изделий оптимизированной формы с формами живой природы, в которых она оптимально распределила материал именно в те зоны, где он несет нагрузку.

Таким образом, концепция цифровых двойников позволяет сформулировать общий подход к нахождению искомого решения с использованием цифровых копий бортовой РЭА КА, которые помогут в оптимизации эффективности процессов проектирования, конструирования, производства и эксплуатации более совершенных версий бортовой РЭА путем более оперативного обнаружения физических проблем и предсказания их последствий (рис. 3) [3].

Однако на сегодняшний день проработка вопроса применимости цифровых двойников в решении задачи нахождения оптимальных

базовых несущих конструкций бортовой РЭА КА, обеспечивающих интенсивный теплоотвод, находится на начальном этапе.



Рис. 2. Формы изделия, оптимизированного под традиционную металлообработку (слева) и аддитивное производство (справа)



Рис. 3. Схема реализации цифрового двойника

В частности, проблемная ситуация состоит в том, что на сегодняшний день отсутствуют:

- 1) единые подходы к созданию цифровых двойников бортовой РЭА КА, позволяющих решить указанную выше задачу;
- 2) принципы выбора параметров бортовой РЭА КА для сбора информации о её техническом и физическом состоянии;
- 3) принципы определения количества точек сбора информации об этих параметрах;
- 4) критерии выбора датчиков для сбора информации об этих параметрах и их оптимального размещения в конструкциях бортовой РЭА КА;

5) математические и компьютерные мультифизические модели бортовой РЭА КА;

6) алгоритмы обработки и интерпретации собираемой датчиками информации о техническом и физическом состоянии бортовой РЭА КА.

Осуществим формализованную постановку научной задачи.

Дано:  $S$  – система (объект исследования, РЭА КА);  $X$  – множество входных параметров (технические характеристики РЭА КА);  $Y$  – множество выходных параметров (технические характеристики РЭА КА);  $y_1, \dots, y_n$  – оптимизируемые выходные параметры (предмет исследования, параметры базовых несущих конструкций РЭА КА);  $Z$  – множество внутренних параметров системы (технические характеристики РЭА КА, параметры теплообмена);  $E$  – множество параметров среды и условий функционирования (характеристики условий эксплуатации РЭА КА). Технические характеристики РЭА КА включают в себя параметры схемы электрической принципиальной; механические, геометрические, термодинамические и другие свойства печатных плат и узлов, конструкции корпуса узлов, блоков, стоек РЭА КА.

Содержательная постановка задачи: разработать метод, методику, способ  $M$  максимизации (или минимизации) выходных параметров бортовой РЭА КА  $y_1, \dots, y_n$  ( $y_i \in Y, i=1..n$ ) в диапазоне значений входных параметров  $X$  посредством изменения значений внутренних параметров  $Z$  при ограничениях на значения параметров среды  $E \subseteq E_{\text{доп}}$  («доп» – допустимые).

Формальная постановка задачи:

найти метод, методику, способ  $M$  такой(-ую), что

$$M: \langle S, X, Y, Z, E \rangle \rightarrow \max y_i | y_i \in Y, i=1..n,$$

или

$$M: \langle S, X, Y, Z, E \rangle \rightarrow \min y_i | y_i \in Y, i=1..n,$$

при ограничениях:

а) на варьируемые параметры:

$$z_k \in [z_{k \min}, z_{k \max}], z_k \in Z \subseteq Z_{\text{доп}}, k=1..|Z|;$$

б) на неварьируемые параметры:

$$x_j \in [x_{j \min}, x_{j \max}], x_j \in X \subseteq X_{\text{доп}}, j=1..|X|;$$

$$e_l = \text{const}, e_l \in E \subseteq E_{\text{доп}}, l=1..|E|.$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / под ред. А. Боровкова. – М.: ООО «Альянс Принт», 2020. – 401 с.

2. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928>, ограниченный (дата обращения: 07.03.2022).

3. Khaled N. Digital Twin Development and Deployment on the Cloud. Developing Cloud-Friendly Dynamic Models Using Simulink/Simscape and Amazon AWS / N. Khaled, B. Pattel, A. Siddiqui. – London: Elsevier, Academic Press, 2020. – 584 p.

УДК 620.93

## ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ НАПРЯЖЕНИЯ

*К.А. Щечилина, студентка*

*Научный руководитель А.А. Чернышев, доцент каф. КИПР*

*г. Томск, ТУСУР, каф. КИПР, k.shechilina@yandex.ru,*

*a-a-chernyshev@inbox.ru*

Рассмотрена проблема тепловыделения преобразователя напряжения (ПН) в стационарном режиме, предназначенного для обслуживания космической аппаратуры. Было выполнено тепловое исследование, рассчитываемое методом конечных элементов. На примере преобразователя напряжения средствами программного обеспечения Solidworks Flow Simulation произведен тепловой расчет электрорадиоэлементов (ЭРЭ), расположенных на двух печатных узлах, и внешних поверхностей конструкции. Определены максимальные температуры тепловыделяющих элементов, а также показано их соответствие тепловым режимам.

**Ключевые слова:** космический аппарат, эксплуатация, тепловое моделирование.

Одной из функций преобразовательной техники является преобразование переменного напряжения, осуществляющееся с помощью трансформаторов. На рынке представлено множество устройств, предназначенных для изменения величины напряжений. Представленная продукция отличается по конструкции, мощности, габаритам и т.п. Особенностью данных устройств является то, что электропитание осуществляется по трем фидерам: один фидер от сети трехфазного переменного тока напряжением 380 В, частотой 50 Гц и два фидера от сети постоянного тока напряжением 175...320 В (основной и резервный). Однако найденные устройства не преобразовывают все необходимые напряжения.

Актуальность темы состоит в том, что для прибора важнейшим показателем служит надежность, а именно, вероятность безотказной

работы в заданных условиях. Энергия, затрачиваемая в процессе преобразования напряжений, выделяется в виде тепла, что приводит к повышению температур прибора и перегреву элементов.

Таким образом, проблема разработки заключается в том, что преобразователь напряжения имеет в своем составе много тепловыделяющих мощных ЭРЭ, для которых необходимо обеспечить тепловые режимы. При нагревании тепловыделяющих ЭРЭ необходимо обеспечить теплоотвод, тем самым найти способ реализации устройства с применением отечественной элементной базы, обеспечивающий надлежащий срок надёжной эксплуатации минимально возможными массогабаритными параметрами, низкую стоимость.

В связи с этим в настоящее время единственным решением для повышения надежности в преобразовании постоянного напряжения 320 В в несколько требуемых значений напряжений (27, 18, 15, 8 В) является использование большего количества моточных элементов, которые отвечают за понижение на несколько напряжений.

Из существующих технических идей исследователи сталкивались такими проблемами проектирования, как:

- 1) неисправность транзисторов или силового трансформатора, связанное с воздействием магнитного поля;
- 2) частое отключение преобразователя в процессе работы, связанное с перегревом ЭРЭ.

Для решения первой проблемы предлагается организация гальванической развязки. Трансформаторы в схеме служат для преобразования одного значения напряжения в другое. На схеме имеется зона высокого и низкого напряжения, поэтому есть риск пробоя между ЭРЭ и элементами проводящего рисунка платы печатной. Тем самым происходит воздействие магнитного поля зоны высокого напряжения на элементы зоны низкого напряжения. Под трансформаторами необходимо предусмотреть диэлектрический зазор, в котором отсутствуют элементы проводящего рисунка.

Преобразователь напряжения преобразовывает входное бортовое напряжение до требуемого уровня. Также он обладает минимально возможными габаритными размерами.

Исследуемое устройство представляет собой отдельный блок с входным и выходным соединителями. Внутри блока два печатных узла. Один из них расположен на металлическом основании, другой – на радиаторе. Платы печатных узлов к основанию и радиатору прессыются.

Для обеспечения эффективного теплоотвода от всех тепловыделяющих элементов необходима их установка непосредственно на ме-

таллические основания. Для некоторых ЭРЭ предусматривают отдельные радиаторы.

В результате теплового моделирования при задании исходных параметров, таких как температура окружающей среды, мощность тепловыделения ЭРЭ, создается визуализация температурного распределения (рис. 1). Наглядно показано размещение элементов в блоке с указанием температур теплонагретых элементов. Наиболее нагретыми местами в приборе являются силовой модуль и пара транзисторов, так как у них наибольшая мощность рассеивания по сравнению с другими элементами.

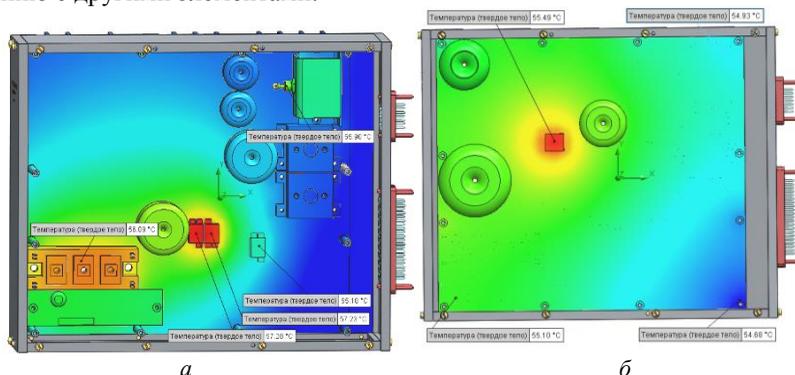


Рис. 1. Распределение тепла на поверхности печатного узла, расположенного на радиаторе, – *а*; на основании – *б*

Указана максимальная температура на поверхности модели, для того чтобы учитывались меры безопасности при контакте с прибором.

Выполнен температурный расчет всех теплонагретых элементов. Расчетные температуры всех тепловыделяющих элементов соответствуют ТУ. Результаты расчетных термодинамических параметров разрабатываемого устройства приведены в таблице.

Данные значения необходимы для соблюдения физичности задачи. Все параметры (перепады давления, минимальные и максимальные значения температур, плотностей и скоростей) получены во всей расчетной области.

Результаты теплового анализа показывают, что в «горячем» случае работают все тепловыделяющие элементы, при этом температуры всех ЭРЭ не превышают максимально допустимые. Самой нагретой зоной прибора являются транзисторы, температура которых в режиме эксплуатации прибора при окружающей температуре среды  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет  $57,28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура внешней поверхности корпуса не превышает  $56,23\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Расчетные термодинамические параметры

Параметр	Min	Max	Запас
Давление, Па	101323	104345	3022
Плотность (твердое тело), кг/м <sup>3</sup>	2640	8900	6260
Плотность (текучая среда), кг/м <sup>3</sup>	1,06815	1,10952	0,04137
Скорость, м/с	0	0,26078	0,260781
Температура (твердое тело), °С	50,4954	57,3185	6,8231
Температура (текучая среда), °С	45,05	57,3185	12,2685
Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>	0,117	25583,2	25583,083

### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 17516.1–90. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам. – 1990. – 42 с.

2. Озеркин Д.В. Системная технология инженерного проектирования РЭС в дипломировании: учеб. пособие / Д.В. Озеркин, В.П. Алексеев. – Томск: ТУСУР, 2012. – 103 с.

УДК 537.3

### РАЗРАБОТКА БУФЕРНОГО УСИЛИТЕЛЯ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 5–15 ГГц

*Ю.А. Миллер, Д.А. Лужайцев, А.О. Туров, магистранты  
Научный руководитель А.С. Сальников, доцент каф. ФЭ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. ФЭ, miller-ua@mail.ru*

Разработана микросхема буферного усилителя диапазона частот 5–15 ГГц с коэффициентом усиления 19 дБ и выходной мощностью по сжатию на 1 дБ 17 дБм. Габаритные размеры кристалла 1,8×0,9 мм. Разработка выполнена на основе технологии GaAs-pHEMT с длиной затвора 0,25 мкм.

**Ключевые слова:** буферный усилитель, 5–15 ГГц, GaAs-pHEMT.

Буферные усилители предназначены для компенсации потерь в тракте при преобразовании или обработке СВЧ-сигнала. Основной характеристикой буферного усилителя является выходная линейная мощность [1]. В отличие от усилителей мощности буферный усилитель обладает невысоким значением коэффициента шума и имеет хорошее согласование в диапазоне рабочих частот.

Разработка буферного усилителя начинается с выбора периферии транзистора выходного каскада и его рабочей точки [2]. Чем больше физические размеры транзистора, тем больше его мощность, но также больше паразитных емкостей, что сказывается на частотных характе-

ристик. Также к параметрам, относительно которых происходит выбор транзистора относится коэффициент усиления. Поэтому, выбирая размеры транзистора, необходимо найти компромисс между выходной мощностью, усилением и потребляемым током. Выбор количества последовательно включенных транзисторов для получения суммарного усиления, необходимого по техническому заданию, происходит после выбора выходного транзистора и его согласования для обеспечения требуемого уровня выходной мощности [3].

В схеме буферного усилителя реализована цепь автосмещения, которая позволяет обеспечить более стабильную рабочую точку, так как снижает погрешность источника питания, и уменьшить общие габариты схемы, так как нет необходимости добавлять втулку питания.

Разработан двухкаскадный буферный усилитель диапазона частот 5–15 ГГц с выходной мощностью 17 дБм, линейным усилением 19 дБ, габаритными размерами кристалла 1,8×0,9 мм, напряжением питания  $V_d = 5$  В. Используются транзисторы с длиной затвора 0,25 мкм в конфигурации 4×100 мкм, технология GaAs-pHEMT.

На рис. 1 представлены результаты расчета коэффициента отражения по входу и выходу.

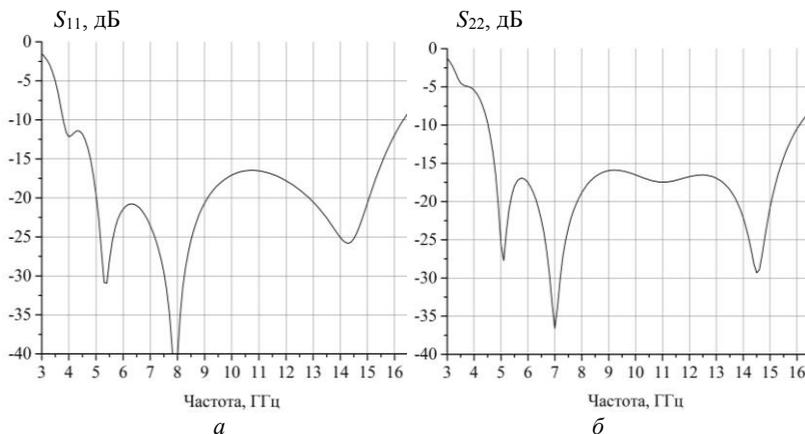


Рис. 1. Частотная зависимость коэффициента отражения: *а* – по входу; *б* – по выходу

Как видно из рис. 1, усилитель имеет хорошее согласование по входу и выходу не более  $-15$  дБ во всем диапазоне рабочих частот.

На рис. 2 представлены результаты расчета коэффициента усиления, где видно, что коэффициент усиления больше 19 дБ во всем диапазоне рабочих частот.

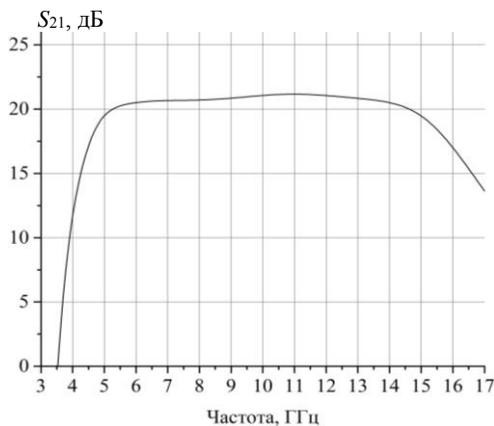


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента усиления

На рис. 3 представлены результаты расчета выходной мощности по сжатию на 1 дБ.

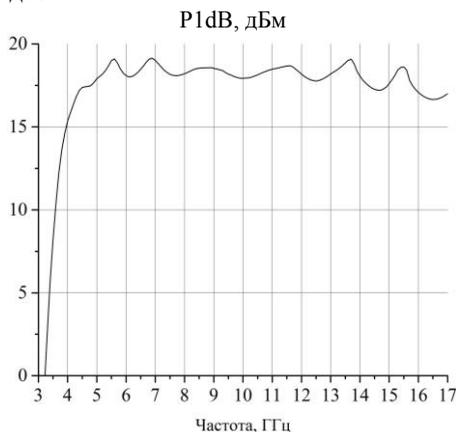


Рис. 3. Частотная зависимость выходной мощности по сжатию 1 дБ

Из рис. 3 видно, что разработанный усилитель обеспечивает выходную мощность более 17 дБм во всем диапазоне рабочих частот.

Произведен поиск аналогов в каталогах предприятий, производящих устройства по технологии GaAs, таких как Analog Devices и Qorvo. Сравнение аналогов представлено в таблице.

Из таблицы видно, что разработанный буферный усилитель не уступает аналогам по усилению и выходной мощности, а также имеет меньшее токопотребление.

### Характеристики аналогов

Усилитель	$f$ , ГГц	$G$ , дБ	P1dB, дБм	$I$ , мА	$U_{пит}$ , В	Размеры, мм
Разработанный	5–15	19–22	17–20	117	5	1,8×0,9
НМС451LP3	5–15	19–22	17–20	127	5	1,27×1,27
НМС1082LP4E	5–18	22–24	23–24	220	5	2,19×1,05

Работа выполнена коллективом научной лаборатории интегральной оптики и радиофотоники при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-03-2020-237/1 от 05 марта 2020 г. (внутренний номер проекта FEWM-2020-0040). Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦПК «Импульс» (регистрационный номер 200568).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Баров А.А. GaAs МИС буферного усилителя X-диапазона / А.А. Баров, В.С. Арыков // Всерос. науч.-техн. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – 2012. – С. 149–153.
2. Hek A.P. Design, realisation and test of GaAs-based monolithic integrated X-bandhigh-power amplifiers. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2002. – 323 p.
3. Королев Г.В. Электронные устройства автоматики: учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1991. – 256 с.

УДК 62-192

### РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ БЛОКА ПИТАНИЯ МАГНИТОМЕТРА МА-5

*Д.Н. Вахрушева, магистрант*

*Научный руководитель А.А. Чернышев, доцент каф. КУДР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. КИПР, djori-7@mail.ru*

Представлены результаты анализов по обеспечению надежности блока питания магнитометра МА-5 (БП МА-5). Анализы приводятся в соответствии с методическими указаниями «Проведение анализов по обеспечению надежности оборудования, систем и космических аппаратов».

**Ключевые слова:** анализ надёжности, блок питания магнитометра МА-5, функциональная схема, устройство приема команд, структурная схема надежности.

Для реализации указанных задач и для обеспечения требований надежности разработана функциональная схема БП МА-5 (рис. 1).

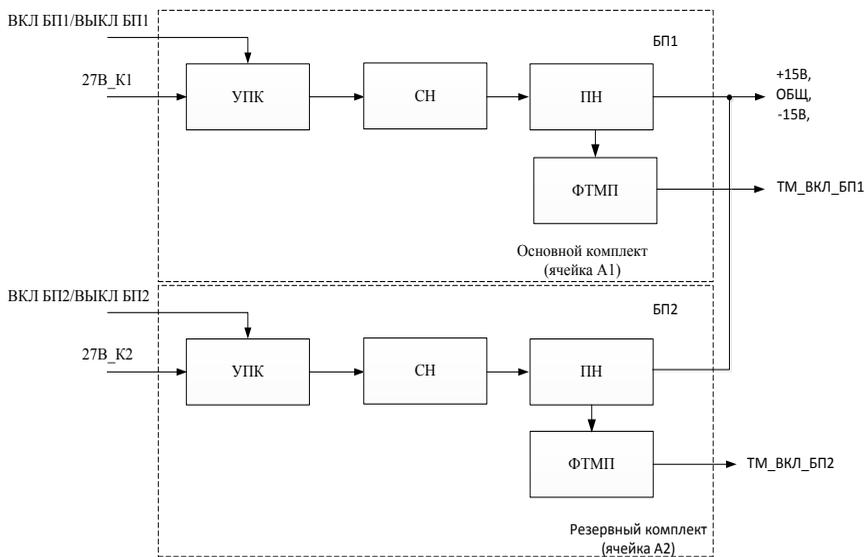


Рис. 1. Функциональная схема БП МА-5: БП – блок питания; ПН – преобразователь напряжения; СН – стабилизатор напряжения; ТМ – телеметрия; УПК – устройство приема команд; ФТМП – формирователь телеметрического параметра

БП МА-5 состоит из двух комплектов БП1 и БП2, один из которых находится в ненагруженном резерве. В соответствии с ТЗ БП МА-5 обеспечивает:

- 1) прием и исполнение матричных команд управления на включение и выключение БП МА-5;
- 2) выдачу в систему телеметрии сигнальных ТМ-параметров о включенных комплектах БП МА-5;
- 3) формирование постоянного двуполярного напряжения питания магнитометра минус ( $15,0 \pm 0,8$ ) В и плюс ( $15,0 \pm 0,8$ ) В.

На рис. 2 обозначение «СНП411» означает один контакт соединителя СНП411-37РП41-1-К, а «РПС45-1» обозначает последовательное соединение одной контактной пары указанного реле и соответствующей обмотки.

В основу расчета надежности по программе автоматизированного расчета надежности (АСРН) положен экспоненциальный закон распределения отказов электрорадиоизделий (ЭРИ).

В табл. 1 приведены результаты расчета вероятности безотказной работы (ВБР) составных частей БП1 (БП2) в течение срока эксплуатации, равного 1 году (8760 ч), полученные с помощью программы

АСРН. В колонке 4 табл. 1 приведены значения ВБР составных частей БП1 (БП2) с учетом поправочных коэффициентов для составных частей, не имеющих внутреннего резервирования.

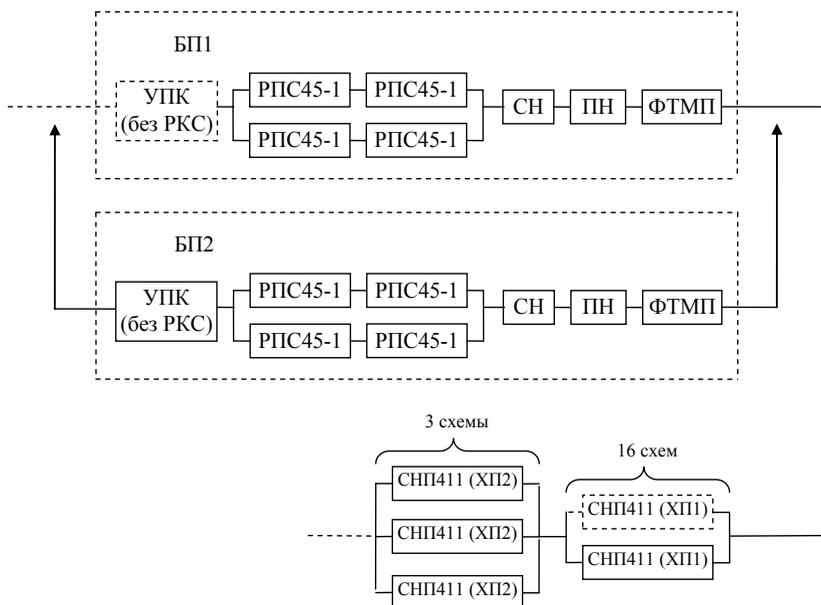


Рис. 2. Общая структурная схема надежности ССН БП МА-5

Таблица 1

**Результаты расчета ВБР**

Наименование составной части БП1 (БП2) и соединителя	ВБР ( $T_5 = 8760$ ч)		
	Обозначение	Значение, полученное по АСРН	Значение с учетом поправочных коэффициентов
1	2	3	4
1. УПК (без РКС)	$P_{УПК}$	0,9996663	0,9999950
2. Обмотка и контактная пара реле РПС45-1 ОС	$P_{РПС45-1}$	0,9999999	0,9999999
3. СН	$P_{СН}$	0,9963654	0,9999459
4. ПН	$P_{РН}$	0,9975177	0,9999630
5. ФТМП	$P_{ФТМП}$	0,9994653	0,9999920
6. Контакт соединителя СНП411-37РП41-1-К ( $K_H = 0,5$ )	$P_{СНП411}$	0,9999363	0,9999990

Расчетное значение ВБР БП МА-5 в течение срока эксплуатации по целевому назначению, равного 1 году (8760 ч), составляет 0,999999994, что удовлетворяет заданному в ТЗ.

Уровень критичности каждого вида отказа определяется по наиболее тяжёлым его последствиям (худший случай) в соответствии с категориями, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

<b>Классификатор уровня критичности</b>		
Уровень критичности	Последствия отказа	
1	Категория катастрофическая	Приводит к полному отказу оборудования
2	Категория критическая	Приводит к серьезным нарушениям функционирования оборудования
3	Категория значительная	Приводит к потере оборудованием системы некоторых эксплуатационных свойств
4	Категория незначительная	Не приводит к потере эксплуатационных характеристик оборудования, но приводит к снижению уровня надежности

Выявленные возможные отказы БП МА-5 имеют уровни критичности 4Р. Они устраняются за счет резервирования БП. Отказов с уровнем критичности 1, 2 и 3 в БП МА-5 не выявлено.

Анализ безопасности проведен с целью разработки мер безопасности по предотвращению и ликвидации опасных ситуаций и их последствий на всех этапах работ с БП МА-5.

Конструкция БП МА-5 и технологические процессы, используемые при изготовлении и эксплуатации прибора, обеспечивают отсутствие критичных по безопасности элементов и гарантируют безопасность обслуживающего персонала. Конструкторская, программно-методическая и технологическая документация на прибор при соблюдении обслуживающим персоналом требований документации обеспечивает отсутствие опасных ситуаций на всех этапах работы с БП.

По результатам анализа безопасности опасные элементы, относящиеся к уровням опасности 1, 2 и подлежащие включению в программу контроля критичных элементов, отсутствуют.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ефремов Л.В. Запас метрологической надежности как критерий оценки исправности средств измерений // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53, № 7.
2. Безопасность жизнедеятельности: учеб. для вузов / С.В. Белов, А.В. Ильницкая, А.Ф. Козьяков и др.; под общ. ред. С.В. Белова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2006. – 448 с.

3. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности: учеб. – М.: Высш. школа, 1977. – 160 с.
4. Бережной В.П., Дубицкий Л.Г. Выявление причин отказов РЭА. – М.: Радио и связь, 1983. – 232 с.

УДК 621.3.061

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА ПРИ СЕРИЙНОМ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРИБОРОВ АППАРАТУРЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТОКОВ**

*К.Ю. Ваулов, студент; Ю.В. Дроздов, инженер АО «НПЦ «Полюс»  
Научный руководитель Н.Н. Кривин, доцент каф. КИПР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. КИПР*

Разработаны программы для нанесения паяльной пасты и установки компонентов на печатную плату; для контроля печатных узлов в системе электрического контроля SPEA. Технологические процессы позволяют качественно изготавливать сборочные единицы с применением ПП и уменьшить массогабаритные характеристики изделия. Исключение человеческого фактора и соблюдение технологических режимов минимизировали количество последующих устранений дефектов и позволяют изготовить изделия в установленный срок.

**Ключевые слова:** поверхностный монтаж, печатные платы.

Основой успешной деятельности предприятия является своевременное выполнение договорных обязательств, зависящее от трудоемкости изготовления изделий. Немалую часть производственного плана составляет изготовление серийных приборов аппаратуры преобразования и распределения специальных токов, имеющих длительный цикл изготовления. Трудоемкость монтажно-сборочных работ занимает более 30% от всей трудоемкости [1].

Проблемой применения технологии поверхностного монтажа для изделий разработки предприятия является применение отечественных компонентов и материалов, изначально не предназначенных для этого.

В связи с данными обстоятельствами усложняется разработка технологического процесса изготовления сборочных единиц с использованием отечественных компонентов и печатных плат с помощью групповых методов пайки по технологии поверхностного монтажа.

Исходя из этого, актуальными являются вопросы, связанные с выбором материалов, согласованием режимов пайки и термопрофиля с заводами-изготовителями, нанесением отечественных припойных паст и хранением ЭРИ, а также согласованием ЭРИ для ТПМ с заказчиком.

Технология поверхностного монтажа позволяет значительно сократить трудоемкость и технологический цикл монтажно-сборочных работ, а также исключить влияние человеческого фактора ручной пайки на качество выпускаемых изделий, но в то же время требует выполнения ряда требований к организации производства, его оснащению и конструктивным решениям, позволяющим применять данную технологию [2]. Зернистость пасты должна соответствовать габаритам контактной площадки. Выбор оптимального размера частиц припоя в паяльной пасте производится на основании минимального шага компонентов. Количество пасты, наносимой на контактные площадки, должно занимать 75–80% ее площади. Несоблюдение требований к припойной пасте приводит к образованию шариков припоя и некачественной пайке (рис. 1).

Температурный профиль определяется исходя из температуры плавления припойной пасты, конструкции и материала печатной платы, типа и размеров, количества и плотности компонентов на ней. При отработке термопрофиля должны соблюдаться требования к четырем стадиям: 1) предварительного нагрева, скорость нагревания – 0,5–1 °C/c, максимальная температура – 95–130 °C; 2) стабилизации, температура 150–170 °C, рекомендуемое время – 30 с; 3) оплавления, температура на 25–45 °C превышает температуру плавления пасты, рекомендуемое время – 45–90 с; 4) охлаждения, рекомендуемая скорость охлаждения – 4 °C/c (рис. 2).

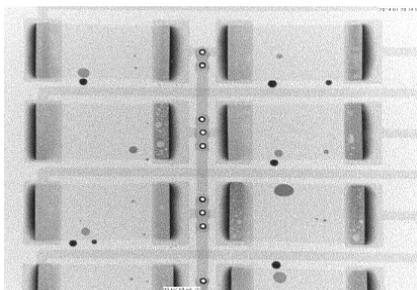


Рис. 1. Образование шариков припоя и некачественная пайка

Узлы с отечественными ЭРИ и припойной пастой, смонтированные по технологии поверхностного монтажа, были установлены на приборы АПРСТ и проведены типовые испытания с положительным результатом. По результатам испытаний были согласованы температурные режимы пайки ЭРИ с предприятиями-изготовителями [3]. Для адаптации конструкторской и технологической документации с применением ТПМ были изменены перечни элементов и сборочные чертежи, разработаны технологические процессы сборки и монтажа.

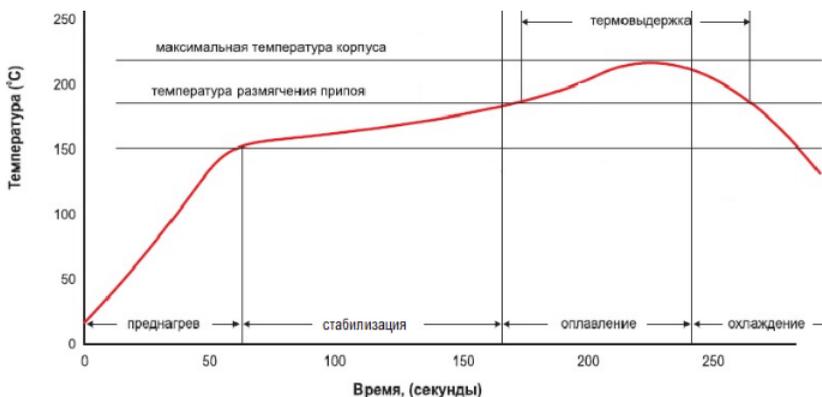


Рис. 2. Температурный профиль

Нарушение вышеуказанных требований приводит к перемыканию контактных площадок и отсутствию паяного соединения.

Внедрена технология поверхностного монтажа припойными пастами ППК-62-3-89А, ППК-62-4-89А взамен паяльной пасты Indium NC-SMQ90 (Sn62/Pb36/Ag2). Выпущена технологическая инструкция, предъявляющая общие требования к технологическому процессу с применением ТПМ. Применяемые в узлах компоненты допущены к применению для ПМ в соответствии с перечнем ЭРИ, приведенным в ТИ.

Технологический процесс сборки реализуется посредством линии поверхностного монтажа, оборудованной автоматическим дозатором, полуавтоматом установки компонентов и конвекционной системой пайки оплавлением. Контроль правильности установки компонентов и их номиналы, наличие цепей и отсутствие коротких замыканий проводятся с помощью системы внутрисхемного и функционального электрического контроля электронных модулей на печатных платах с «летающими тестовыми пробями» SPEA4060, которая позволяет максимально контролировать печатные узлы в условиях серийного производства. Система удовлетворяет качественные запросы по электрическому тестированию и контролю качества сборки.

Для каждого узла отработан температурный профиль пайки. Разработаны программы для контроля печатных узлов в системе электрического контроля SPEA. Разработанные технологические процессы позволяют качественно изготавливать сборочные единицы с применением ПП и уменьшить массогабаритные характеристики изделия. Исключение человеческого фактора и соблюдение технологических режимов минимизировали количество последующих устранимых дефектов и позволяют изготовить изделия в установленный срок.

Средний уровень удельной трудоемкости узлов из приборов, входящих в АПРСТ, изготовленных по технологии поверхностного монтажа, снизился на 40,1%.

Фактические затраты рабочего времени на монтаж печатных плат, входящих в состав приборов, при использовании технологии поверхностного монтажа снизило трудоемкость АПРСТ на 29% (таблица).

#### **Фактические затраты рабочего времени на монтаж ПП**

Приборы и аппаратура	Ручной монтаж, ч	С применением технологии поверхностного монтажа, ч	Разница фактической трудоемкости, %
ПУА	843,5	343,5	59,3
ПН-5	1357,6	1115,4	17,8
ПН-10	678,8	557,7	17,7
ПН-25	407,28	334,62	17,8
ПН-50	271,52	223	17,9
АПРСТ	3766,2	2781,2	29

Внедрение ТПМ в аппаратуру преобразования и распределения специальных токов с применением отечественных компонентов и материалов позволило значительно сократить технологический цикл изготовления, повысить качество продукции, уменьшив количество несоответствий и затрат времени на доработки.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Сускин В.В. Основы технологии поверхностного монтажа. – Рязань: Узорочье, 2001.
2. Унифицированный конструкторский документ. Радиоэлектронная аппаратура и приборы. Поверхностный монтаж ЭРИ, имеющих свинцовое и бессвинцовое покрытие выводов: АФЕК.005.900.
3. ТИ 0217149.25088.00047. Поверхностный монтаж ЭРИ на печатные платы.

УДК 004.942

### **ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПРОЦЕССА ЕЁ ИСПЫТАНИЙ НА ЭТАПАХ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

*Л.Ю. Войко, аспирант; Н.Н. Кривин, доцент каф. КИПР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. КИПР, l.voiko@mail.ru, nikolai.n.krivin@tusur.ru*

Рассматривается проблема совершенствования процесса испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов на

этапах наземной экспериментальной отработки и изготовления и осуществляется формализованная постановка задачи исследования.

**Ключевые слова:** оптимизация, испытания, цифровой двойник, бортовая радиоаппаратура, космические аппараты.

Космические аппараты (КА) с длительным сроком активного существования (САС) эксплуатируются в сложных и жестких условиях. Поэтому для обеспечения надежной работы бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) её изготовление заканчивается проведением всесторонних наземных испытаний на воздействие разных физических факторов. Ключевая проблема состоит в том, что испытания на различные воздействия можно проводить только последовательно (по отдельности). Следствием этого является невозможность оценки надежности и устойчивости конструкции к одновременному воздействию нескольких факторов, а также к значительному замедлению ввода КА в эксплуатацию.

Таким образом, проблема исследования заключается в необходимости решения задачи мультифизического моделирования бортовой РЭА КА с длительным САС для процесса испытаний на этапах наземной экспериментальной отработки и изготовления штатной продукции с целью сокращения длительности испытаний и повышения достоверности экспериментальных данных.

Рост цифровизации производственных процессов позволяет сформулировать подход к нахождению искомого решения с использованием цифровых копий бортовой РЭА КА с длительным САС, которые помогут в повышении эффективности процессов испытаний этой РЭА путем создания и анализа её мультифизических моделей [1]. Однако на сегодняшний день проработка вопроса применимости цифровых двойников в решении описанной задачи находится на начальном этапе. В частности, на сегодняшний день отсутствуют единые подходы к созданию цифровых копий (цифровых двойников) бортовой РЭА КА, позволяющих решить указанную выше задачу; принципы выбора параметров бортовой РЭА КА для сбора информации о её техническом и физическом состоянии; принципы определения количества точек сбора информации об этих параметрах; критерии выбора датчиков для сбора информации об этих параметрах и их оптимального размещения в конструкциях бортовой РЭА КА; высокоадекватные математические и компьютерные мультифизические модели бортовой РЭА КА, позволяющие с высокой степенью достоверности моделировать совместное воздействие нескольких факторов на бортовую РЭА КА.

В процессе моделирования сложных изделий, состоящих из большого количества элементов, невозможно разделить задачу построения прецизионных моделей на последовательность задач из от-

дельных дисциплин (тепломассопереноса, механики, гидродинамики). Учесть взаимосвязь различных физических процессов и их влияние на функционирование изделия в реальных условиях эксплуатации можно при помощи мультидисциплинарного математического и компьютерного анализа. Мультифизическое моделирование означает совокупность математических моделей и программного обеспечения, описывающих физические разные явления, и инженерных дисциплин [1, 2].

Таким образом, предполагаемая научная актуальность ожидаемых результатов исследования заключается в дальнейшем развитии методологии проектирования, конструирования и технологии изготовления бортовой РЭА КА с использованием подхода цифровых двойников. При этом формализованная постановка научной задачи мультифизического моделирования будет следующей.

Имеется:  $S$  – система (объект исследования, РЭА КА);  $X$  – множество входных параметров (технические характеристики РЭА КА);  $Y$  – множество выходных параметров (технические характеристики РЭА КА, предмет исследования);  $Z$  – множество внутренних параметров системы (технические характеристики РЭА КА);  $E$  – множество параметров среды (факторов эксплуатации);  $Q$  – множество показателей качества/эффективности функционирования системы (предмет исследования). Технические характеристики РЭА КА включают в себя параметры схемы электрической принципиальной; механические, геометрические, термодинамические и другие свойства печатных плат и узлов, конструкций корпуса узлов, блоков, стоек РЭА КА и т.д.

Содержательная постановка задачи исследования: необходимо разработать модель  $\mu$  системы  $S$ , устанавливающей отношение между изменением множества выходных параметров  $Y$  и множества показателей эффективности функционирования системы  $Q$  от множества значений входных параметров  $X$ , множества значений внутренних параметров  $Z$ , множества значений параметров условий функционирования  $E$ . Необходимо учесть то, что значения параметров множеств  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $E$  ограничены условиями физической реализуемости:

$$X \subseteq X_{\text{доп}}, Y \subseteq Y_{\text{доп}}, Z \subseteq Z_{\text{доп}}, E \subseteq E_{\text{доп}},$$

где индекс «доп» значит «допустимые».

Формальная постановка научной задачи:

$$\mu: \langle S, X, Z, E \rangle \rightarrow Y, Q \mid X \subseteq X_{\text{доп}}, Y \subseteq Y_{\text{доп}}, Z \subseteq Z_{\text{доп}}, E \subseteq E_{\text{доп}}.$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / под ред. А. Боровкова. – М.: Альянс Принт, 2020. – 401 с.
2. ГОСТ Р 57700.37–2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200180928>, ограниченный (дата обращения: 07.03.2022).

**СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ АВТОСИМУЛЯТОРОВ**  
**Н.В. Тамазлыкарь, К.Л. Юртанов, Н.С. Усанкин, В.С. Маслов,**  
**Л.Ю. Смирнов, Н.А. Гончаров, НИ ТПУ ИЯТШ ОЯТЦ**  
*г. Томск, НИ ТПУ, nvt10@tpu.ru*

Проведён обзор различных устройств для автосимуляторов, создано устройство для автосимуляторов, которое позволяет управлять виртуальным автотранспортом в компьютерных приложениях без применения стандартных периферийных устройств.

**Ключевые слова:** устройство для автосимуляторов, микроконтроллер, энкодер, Arduino, потенциометр.

В настоящее время пользуются популярностью симуляторы вождения, реализованные в виде компьютерного приложения. Для более комфортного и реалистичного управления виртуальным автотранспортом разрабатываются периферийные устройства в виде отдельных частей автомобиля, например: рулевое колесо, педали управления, рычаги переключения передач и ручного тормоза и т.д.

Целью работы является создание устройства, позволяющего управлять автотранспортом в автосимуляторах для получения первичных навыков вождения и развлечения.

Разработана электрическая схема устройства на базе микроконтроллера Arduino Pro Micro [1], по которой была создана соответствующая часть устройства. Схема представлена на рис. 1.

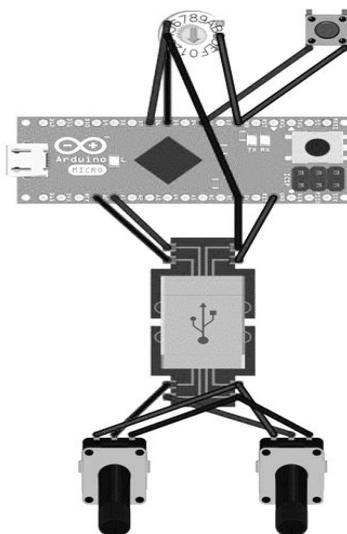


Рис. 1. Электрическая схема устройства

Одной из главных частей устройства является энкодер, связанный с рулевым колесом механически, который реагирует на изменение угла поворота рулевого колеса. В устройстве также используются потенциометры, которые механически связаны с педалями.

Для энкодера в стационарном состоянии задано начальное положение. В случае изменения положения рулевого колеса происходит отклонение от начального положения. Потенциометры в зависимости от положения педалей передают сигнал, пропорциональный изменению сопротивления потенциометра. Микроконтроллер Arduino Pro Micro отправляет преобразованные сигналы в компьютерное приложение.

Проведены эксперименты, позволившие определить и задать угол поворота рулевого колеса и силу нажатия на педаль. Проведено тестирование устройства, по результатам которого была подтверждена его стабильная работа без сбоев.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Петин В.А., Биняковский А.А. Практическая энциклопедия Arduino. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 166 с.

## **ПОДСЕКЦИЯ 1.3**

### **РАДИОТЕХНИКА**

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

УДК 621.372.542

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРУЮЩИХ СХЕМ В САПР ADVANCED DESIGN SYSTEM В.Г. Баканова, магистрант каф. СВЧиКР**

*Научный руководитель А.А. Трубачев, доцент каф. СВЧиКР  
г. Томск, ТУСУР, 280111 varya.bakanova@mail.ru*

Приведены результаты моделирования фазовращателей на основе фильтрующих схем в САПР Advanced Design System 2022.

**Ключевые слова:** фазовращатель, фильтр нижних частот, фильтр верхних частот, фазовый сдвиг.

В настоящее время идёт активное развитие радиоэлектронной аппаратуры СВЧ-диапазона: увеличивается область применения, расширяются физические возможности. В современных радиолокационных, навигационных и измерительных системах СВЧ-диапазона достаточно часто возникает задача манипулирования фазой сигнала. Для решения этой задачи применяются фазовращатели.

В рамках исследовательской работы было проведено моделирование фазовращателей в системе автоматизированного проектирования (САПР) Advanced Design System 2022 и исследование влияния уточнения электрической схемы на фазовый сдвиг.

Фазовращатели строились на основе фильтрующих схем. Фазовращатель представляет собой устройство, имеющее два канала распространения сигнала, в одном из которых реализована цепь фильтра нижних частот (ФНЧ), а в другом – цепь фильтра верхних частот (ФВЧ). Такая реализация позволяет получить разность фазочастотных характеристик фильтров примерно постоянной величины в рабочей полосе частот.

Технические требования к фазовращателям: рабочая частота – 1 ГГц; рабочая полоса частот – 0,9–1,1 ГГц; значения фазового сдвига –

180, 90, 45, 22,5°; отклонение фазы от номинального значения фазы в пределах рабочей полосы частот не более 5°.

Производитель реальных компонентов, используемых для моделирования, – компания Murata [1]. Материалом диэлектрической подложки является стеклотекстолит FR-4 [2].

Исследование проводилось на основе следующих типов электрических схем: фазовращатели на идеальных пассивных компонентах, фазовращатели на реальных пассивных компонентах и топологическое моделирование фазовращателей на реальных компонентах и микрополосковых линий передачи.

Фазовращатели на определенный фазовый сдвиг формируются путем установки ФНЧ и ФВЧ в разные каналы передачи с собственным фазовым сдвигом в два раза меньше требуемого [3]. Так, например, для реализации фазовращателя на 180° необходимо рассчитать ФВЧ со значением фазы на рабочей частоте, равной 90°, а ФНЧ – с фазой –90°.

Пример фильтров для фазовращателя на идеальных пассивных компонентах приведен на рис. 1.

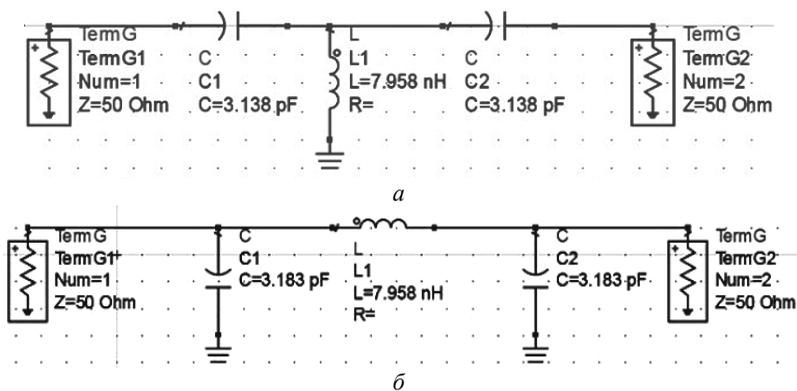


Рис. 1. Модели в САПР: ФНЧ – а; ФВЧ – б

Пример топологического моделирования фильтра для фазовращателя на реальных компонентах и микрополосковых линиях передачи приведен на рис. 2.

Ниже на рис. 3 приведены результаты моделирования фазовращателей в САПР Advanced Design System 2022. Результаты моделирования на идеальных пассивных компонентах представлены графиком Ideal, моделирования на реальных компонентах – Real, топологическое моделирование – Topolog.

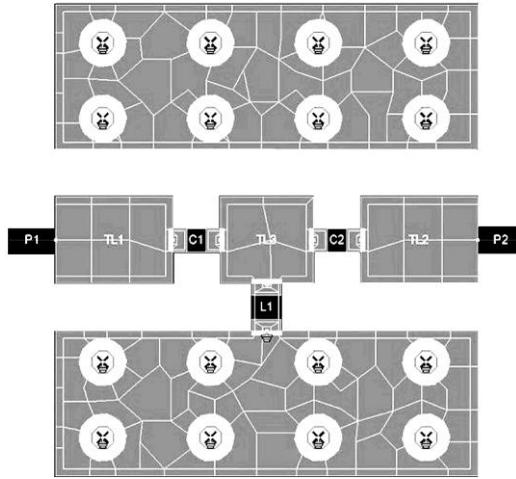


Рис. 2. Топологическая схема ФВЧ в САПР

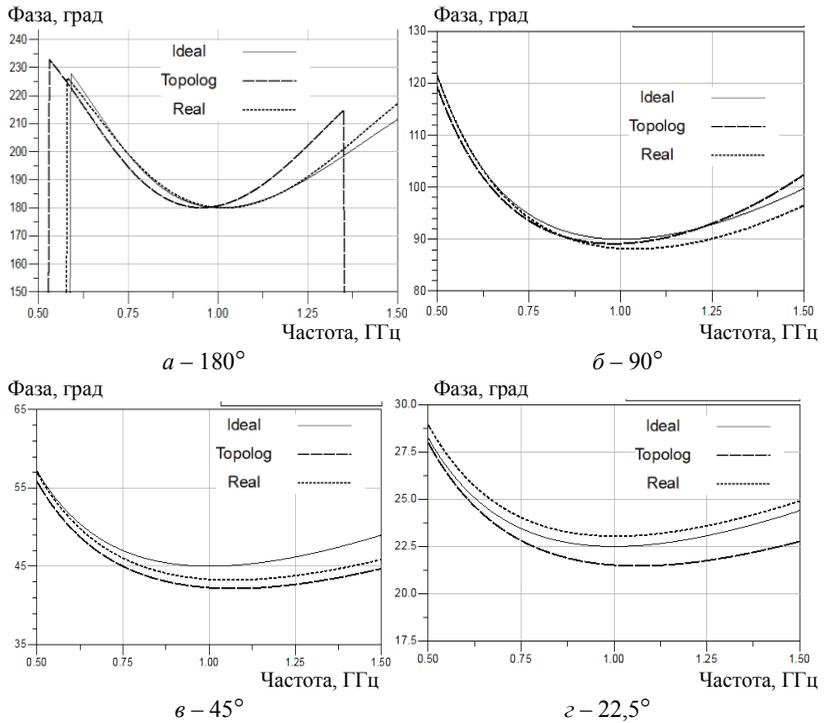


Рис. 3. Диаграммы направленности в  $E$ - и  $H$ -плоскостях

Как видно из графиков на рис. 3, смоделированные фазовращатели имеют небольшие отклонения при уточнении параметров электрической схемы. При уменьшении значения фазового сдвига увеличивается рабочая полоса частот.

**Заключение.** В ходе исследования были смоделированы фазовращатели различными методами моделирования. Чем сложнее методы моделирования мы применяем, тем больше отклоняется значение фазы на рабочей частоте от требуемой. Так, например, отклонение от требуемого значения при топологическом моделировании фазовращателя на  $180^\circ$  составляет  $0,679^\circ$  (0,38%), а при моделировании фазовращателя – на  $45-2,74^\circ$  (6,08%). В целом данные результаты удовлетворяют техническим требованиям, и по топологическим схемам возможно изготовить фазовращатели с требуемыми характеристиками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Electronic Components [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.murata.com/en-eu/products> (дата обращения: 17.11.2021).
2. Стеклотекстолит FR-4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fr4.tabe.ru/fr4.html> (дата обращения: 10.10.2021).
3. Tang Xinyi. Broadband phase shifter design for phased array radar systems. – Huazhong University of Science and Technology, China, 2011. – 199 p.

УДК 621.372.2

#### ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННОГО КАЛИБРАТОРА ДЛЯ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ

*И.В. Хмара<sup>1,2</sup>, В.Г. Нечаев<sup>1,2</sup>, Д.С. Данилов<sup>1</sup>, А.С. Загородний<sup>1,2</sup>,  
О.В. Кравченко<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>АО «НПФ МИКРАН», <sup>2</sup>Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)*

*г. Томск, ТУСУР, [htara.iv@micran.ru](mailto:htara.iv@micran.ru)*

Представлены результаты измерения параметров монолитной интегральной схемы (МИС) электронного калибратора (ЭК) и СВЧ-модуля на ее основе для векторного анализатора цепей с рабочим диапазоном частот от 10 МГц до 26,5 ГГц. Выведены в таблицу значения эффективных параметров ЭК.

**Ключевые слова:** электронный калибратор, эффективные параметры, калибровка, векторный анализатор цепей.

Калибровка ВАЦ и коррекция измеряемых данных являются обязательным требованием, влияющим на точность измерений. Кроме случайных погрешностей, которые определяются температурной и

временной нестабильностью узлов анализатора, присутствуют систематические погрешности, вызванные неидеальностью элементов измерительного тракта. Калибровка позволяет провести учет этих ошибок и существенно уменьшить их.

Принцип работы калибратора заключается в последовательном подключении к измерительным портам ВАЦ меры импеданса, соответствующей определенной калибровочной нагрузке: Short – короткозамкнутая нагрузка (КЗ), Open – нагрузка холостого хода (ХХ), Load – согласованная нагрузка (СН), Thru – мера «на проход» (перемычка) [1].

Монолитная интегральная схема с диапазоном рабочих частот от 0 до 50 ГГц спроектирована с использованием коммутационных рНЕМТ-транзисторов с шириной затвора 50 мкм на подложке арсенида галлия 100 мкм, изготовлена в АО «НПФ «Микран» [2].

На рис. 1 представлены основные характеристики МИС в виде частотных зависимостей модуля коэффициента передачи (КП) перемычки и дисбаланса фаз между нагрузками ХХ и КЗ.

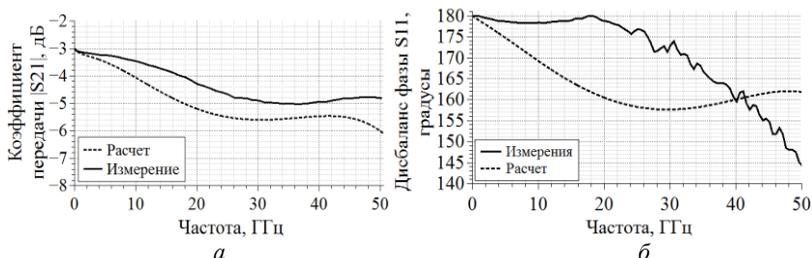


Рис. 1. Частотная зависимость модуля КП перемычки  $|S_{21}|$  (а) и дисбаланса фаз ХХ и КЗ (б) МИС

Как показано на рис. 1, измеренный модуль коэффициента передачи в режиме «на проход» не превышает уровня  $-5$  дБ во всем диапазоне частот, а разница фаз между нагрузками ХХ и КЗ не хуже  $120^\circ$ , что удовлетворяет современным требованиям по ЭК.

**Определение эффективных параметров систематической погрешности.** Исследование эффективных параметров калибратора проводилось в составе СВЧ-блока с коаксиальными соединителями типа 3,5 мм, в связи с этим измерения выполнялись в диапазоне частот от 10 МГц до 26,5 ГГц. Схему ВАЦ после калибровки и коррекции можно представить в виде идеального анализатора и искажающего адаптера (ИА). Из-за присутствия ИА возникает систематическая погрешность измерений. Характеристики ИА описываются комплексными S-параметрами, которые определяются как  $E_D$ ,  $E_S$ ,  $E_R$  (рис. 2) [3].

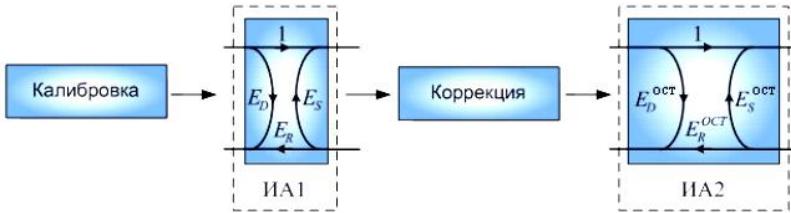


Рис. 2. Схема ВАЦ после калибровки и коррекции

Величина  $E_D$  – направленность, характеризует отражение в тракте ИА. Величина  $E_S$  – рассогласование источника сигнала, описывает отраженный от ИА сигнал, который повторно падает на нагрузку. Величина  $E_R$  называется неравномерностью тракта отраженного сигнала и характеризует коэффициент передачи в тракте ИА отраженного от нагрузки сигнала.

После получения оценок факторов систематической погрешности и их коррекции ВАЦ можно представить в виде идеального измерителя и ИА2 (см. рис. 2). Данный адаптер вносит гораздо меньшие (остаточные) искажения, определяемые величинами  $E_D^{ост}$ ,  $E_S^{ост}$ ,  $E_R^{ост}$ , которые определяют точность оценки комплексного коэффициента отражения ИУ и называются эффективными факторами (параметрами) систематической погрешности. Для определения остаточных факторов направленности, рассогласования источника и неравномерности тракта отраженного сигнала была использована методика, рассмотренная в [3].

Результаты измерений представлены на рис. 3–5. Все погрешности оценивались в двух частотных диапазонах от 10 МГц до 13,5 ГГц и от 13,5 до 26,5 ГГц.

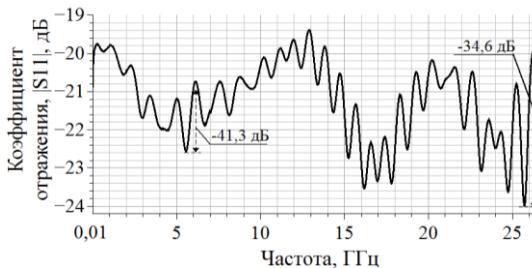


Рис. 3. Частотная зависимость модуля КО эффективной направленности

Полученные значения эффективных параметров для электронного калибратора занесены в таблицу. Для сравнения в таблице представлены параметры ЭК компании «Keysight Technologies» [4].

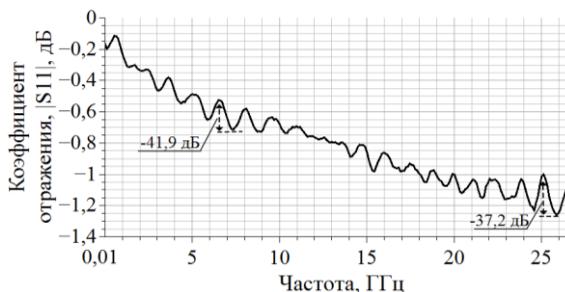


Рис. 4. Частотная зависимость модуля КО эффективного рассогласования источника сигнала

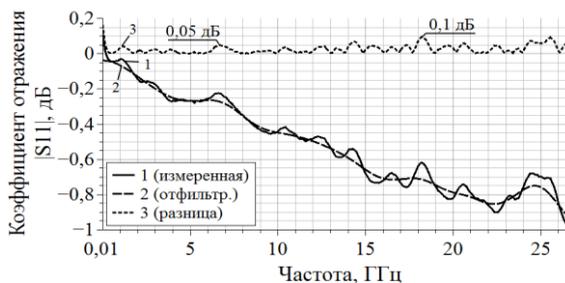


Рис. 5. Частотная зависимость модуля КО эффективной неравномерности тракта отраженного сигнала

### Значения эффективных параметров

Параметр	ЭК5-50		N4691D		N755xA	
	АО «НПФ «Микран» от 10 МГц до 13,5 ГГц	от 13,5 ГГц до 26,5 ГГц	«Keysight Technologies» от 10 МГц до 13,5 ГГц	от 13,5 ГГц до 26,5 ГГц	«Keysight Technologies» от 10 МГц до 13,5 ГГц	от 13,5 ГГц до 26,5 ГГц
$\Gamma_{0,01}$ (дБ)	-41	-35	-46	-41	-36	-36
$\Gamma_{0,05}$ (дБ)	-42	-37	-45	-40	-28	-27
$\Gamma_{\text{нр}}(\pm \text{дБ})$	0,05	0,1	0,05	0,05	0,25	0,3

**Заключение.** Использование модуля электронного калибратора ВАЦ позволяет уменьшить ряд существенных недостатков, вызываемых при работе с механическими стандартами калибровочных мер, а именно: время калибровки, износ соединителей калибровочных мер, износ портов ВАЦ и используемых при калибровке дополнительных СВЧ-кабелей, вероятность ошибки оператора (человеческий фактор).

На основе результатов измерений стоит отметить, что разработанный модуль электронного калибратора по своим параметрам не уступает зарубежным аналогам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Danilov D., Drobotun N., Medvedev A., Ulyanov V. Electronic calibrator MMIC with frequency range up to 50 GHz for vector network analyzers in GaAs pHEMT technology // ITM Web of conferences. – 2019. – Vol. 30, 11009. EDP Science, eISSN: 2271–2097. P. 1–7.
2. Данилов Д.С. Электронный калибратор для векторного анализатора цепей до 40 ГГц / Д.С. Данилов, В.Г. Нечаев, А.С. Загородний, Г.Г. Гошин // Электронные средства и системы управления: матер. докладов XVII Междунар. науч.-практ. конф.: ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2021. – С. 109–111.
3. Ладур А.А. Электронный калибратор векторного анализатора цепей: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, ТУСУР, 2013. – 98 с.
4. Electronic Calibration (ECal) Modules for Vector Network [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-06783/technical-overviews/5963–3743.pdf> (дата обращения: 26.02.2022).

УДК 534.23

### АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЛЕВИТАЦИИ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

*С.Н. Росляков, аспирант каф. радиофизики НИ ТГУ;*

*Д.Я. Суханов, проф., д.ф.-м.н.*

*г. Томск, ТГУ, [rsnrns@mail.tsu.ru](mailto:rsnrns@mail.tsu.ru)*

Представлено описание аппаратной части установки для управления частицами, основанной на левитации в широкополосном и ультразвуковом поле, так как технологии ультразвукового управления частиц активно находят применение в медицине, смешивании химических реактивов, пайке электронных компонент и 3D-печати. Экспериментально продемонстрирована возможность управления частицами в ультразвуковом поле.

**Ключевые слова:** акустическая левитация, фазированная решетка, ультразвуковая ловушка.

Первые работы, связанные с воздействием акустического поля на частицы, были проведены Л.П. Горьковым [1]. Он предложил расчет радиационных сил, действующих на частицу в жидкостях и газах под воздействием ультразвукового поля. Формулировка потенциала Горькова широко используется и в настоящее время, поскольку теоретическая формулировка соответствует физическим эффектам. В простейшем случае левитация возникала в монохроматических стоячих ультразвуковых волнах с длиной волны, более чем в два раза превышающей размеры частиц [2, 3].

В настоящее время существует множество вариантов исполнения установки для левитации, основанных на различных комбинациях решеток ультразвуковых излучателей. В работах [4–6] рассматривается установка, в которой излучатели расположены на сегменте сферы. Подобная конфигурация позволит создавать достаточно большие силы для левитации частиц, размеры которых соизмеримы с длиной волны и больше нее. Левитация в рассматриваемой схеме реализуется за счет формирования в центре сферы пятна фокусировки, поскольку синфазные источники располагаются равноудаленно от фокуса. Такой подход позволяет надежно удерживать частицы при движении или повороте излучателей, однако не позволяет управлять ими. С помощью подобной технологии возможна левитация как частиц, соизмеримых с длиной волны, так и много больше нее. Такой подход позволяет задать необходимое распределение, но не позволяет его изменять и перемещать в процессе левитации.

Похожая конфигурация излучателей используется в [7]. Формируемое пятно представляет собой вихревое акустическое поле. Вихревое поле формируется за счет внесения задержки излучения между соседними источниками. При таком подходе пятно получается больше, что позволяет левитировать частицы больше длины волны, однако частицы становятся менее устойчивыми.

В [8] показан метод для сортировки частиц различного размера. Сортировка основана на контролируемом изменении фазы акустического сигнала. Разделения частиц добиваются за счет тонкой настройки изменения фазы так, чтобы большие частицы могли получить достаточную скорость при переходе фазы через  $\pi$  и попасть в следующий узел стоячей волны, а более мелкие частицы не смогли перейти в следующий узел и вернулись в начальную позицию. Частицами размером порядка микрометра позволяют манипулировать акустические пинцеты [9,10]. Их конструкция создает высокочастотное сфокусированное акустическое поле, которое позволяет захватывать частицы и удерживать их достаточно сильно, так что при перемещении пинцета частица остается в точке фокусировки.

Одним из наиболее популярных вариантов левитационной установки является размещение решеток на гранях куба [11, 12]. Частицы левитируют за счет скрещенных монохроматических волн, а за счет перестройки фазы добиваются их перемещения в плоскости.

В [13] приведен способ акустической левитации и пайки левитирующих элементов. Также нами ранее были проведены эксперименты по узкополосной левитации [14] малоразмерных частиц и линейных отрезков длиной больше длины волны. Аппаратная часть в системе

включала две решетки (для узкополосной левитации), каждая решетка состояла из 91 излучающего элемента типа МА40С4С, размещенного в шестиугольной сетке с шагом 11 мм на поверхности сферы радиусом 180 мм. Расстояние между массивами составляло 340 мм. Элементы одной матрицы были соединены параллельно и присоединены к источнику сигнала с усилителем на микросхеме TDA7384A. Амплитуда сигнала, подаваемого на ультразвуковые излучатели, составляла 15 В. Сигналы формировались с помощью цифро-аналогового преобразователя на микроконтроллере STM32F407. Каждая решетка подключалась к отдельному каналу усилителя с отдельным каналом цифроаналогового преобразователя. Для широкополосной левитации рассматривалась схожая система подключения на основе STM32F407, а также на основе ПЛИС типа Spartan-6 для управления каждым излучателем в отдельности. В качестве ЦАП рассматривались варианты с использованием MAX5480 и резисторов с разным номиналом. Экспериментально показана практическая работоспособность описываемых подходов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горьков Л.П. О силах, действующих на малую частицу в акустическом поле в идеальной жидкости // Доклады АН СССР. – 1961. – Т. 140, № 1. – С. 88–91.
2. Bindal V.N., Saksena T.K., Jain S.K., Gurmukh Singh. Acoustic Levitation and its Application in Estimation of High Power Sound Field // Applied Acoustics. – 1984. – Vol. 17. – P. 125–133.
3. Kozuka T., Yasui K., Tuziuti T., Towata A., Iida Y. Noncontact Acoustic Manipulation in Air // Japanese Journal of Applied Physics. – 2007. – Vol. 46, No. 7B. – P. 4948–4950. DOI: 10.1143/JJAP.46.4948.
4. Marzo A., Cox L., Caleap M., Croxford A., Drinkwater B.W. Realization of compact tractor beams using acoustic delay-lines // Appl. Phys. Lett. – 2017. – Vol. 110. – P. 014102. DOI: 10.1063/1.4972407.
5. Marzo A. Barnes B., Drinkwater W. TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator // Review of Scientific Instruments. – 2017. – Vol. 88. – P. 085105. DOI: 10.1063/1.4989995.
6. Liu P., Ming D., Tan C.S., Lin B. Acoustic trapping with 3D-manipulation // Applied Acoustics. – 2019. – Vol. 155. – P. 216–221. DOI: 10.1016/j.apacoust.2019.06.008.
7. Marzo A. Caleap B., Drinkwater W. Acoustic Virtual Vortices with Tunable Orbital Angular Momentum for Trapping of Mie Particles // Physical review letters. – 2018. – Vol. 120. – P. 044301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.044301.
8. Andrade M.A.B., Skotis G.D., Ritchie S., Cumming D.R.S., Riehle M.O., Bernassau A.L. Contactless Acoustic Manipulation and Sorting of Particles by Dynamic Acoustic Fields // IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control. – 2016 Oct. – Vol. 63(10). – P. 1593–1600. DOI: 10.1109/TUFFC.2016.2608759.

9. Dinga X., Lina S.S., Kiralya B., Yueb H., Lic S., Chianga I., Shia J., Benkovic S.J., Huang T.J. On-chip manipulation of single microparticles, cells, and organisms using surface acoustic waves // Contributed by Stephen J. Benkovic. – June 4, 2012 (sent for review March 12, 2012)/ DOI: 10.1073/pnas.1209288109/-DCSupplemental.

10. Chen X., Lam K.H., Chen R., Chen Z., Qian X., Zhang J., Yu P., Zhou Q. Acoustic levitation and manipulation by a high-frequency focused ring ultrasonic transducer // Appl. Phys. Lett. – 2019. – Vol. 114. – P. 054103. DOI: 10.1063/1.5066615.

11. Ochiai Y., Hoshi T., Rekimoto J. Three-Dimensional Mid-Air Acoustic Manipulation by Ultrasonic Phased Arrays. – May 2014. – Vol. 9, Is. 5. DOI: 10.1371/journal.pone.0097590.g001.

12. Marzo A., Seah B.W., Drinkwater D.R., Sahoo B., Long S. Subramanian. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects // Nature Communications Published. – 27 Oct. 2015. DOI: 10.1038/ncomms9661.

13. Putkis O. Contactless manipulation apparatus, assembly method and 3d printing // International Publication Date. – 27 April 2017. WO 2017/068435 A1.

14. Sukhanov D.Y., Roslyakov S.N., Emel'yanov F.S. Levitation and Control for an Ordered Group of Particles and Rectilinear Structures in an Ultrasonic Field // Acoustical Physics. – 2020. – Vol. 66(2). – P. 137–144. DOI: 10.1134/S1063771020020104.

УДК 621.375.4

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ-ШИРОКОПОЛОСНОГО  
УСИЛИТЕЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОГО УСИЛЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ GaN-ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ**

*Н.И. Гоголев, магистрант; Д.С. Брагин, ст. преп.;*

*А. Салих, аспирант*

*Научный руководитель В.Д. Дмитриев, доцент каф. ТОР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. ТОР, dvd51@mail.ru*

Рассмотрено моделирование СВЧ-широкополосного усилителя распределенного усиления (УРУ) на основе GaN-полевых транзисторов, выполненного на пассивных элементах.

**Ключевые слова:** усилитель распределенного усиления, GaN-полевой транзистор, коэффициент передачи, выходная мощность.

Усилитель распределенного усиления (УРУ) – это усилитель, сигнал в котором параллельно усиливается несколькими активными элементами (транзистор или электронная лампа), в отличие от классического каскадного усилителя, усилительные элементы которого соединены последовательно. Ограничение каскадного усилителя заключается в том, что его произведение усиления на полосу пропускания

изначально ограничено, однако УРУ такому ограничению не подлежит [1–2].

Задачей данной работы было моделирование СВЧ-широкополосного УРУ на основе GaN-полевых транзисторов в диапазоне рабочих частот 1–10 ГГц, с выходной мощностью не менее 23 дБм, при значениях коэффициента передачи не менее 15 дБ, коэффициентов отражения по входу и выходу не более –10 дБ.

Были рассчитаны коэффициенты отражения по входу и выходу, и коэффициент передачи (рис. 1), а также выходная мощность УРУ по сжатию на 1 дБ (рис. 2) в исследуемом диапазоне частот. Моделирование и расчет параметров проводились в программном пакете AWR Design Environment 15.

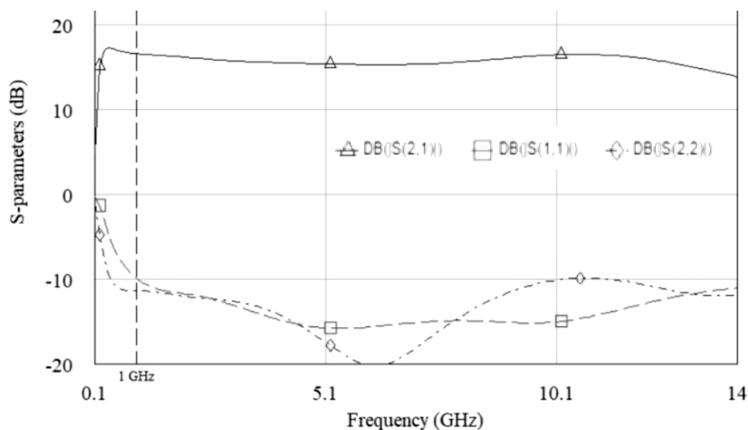


Рис. 1. S-параметры УРУ

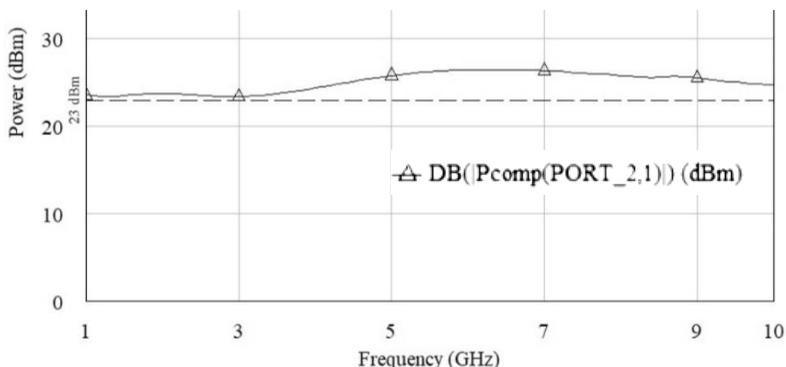


Рис. 2. Выходная мощность УРУ

На основе GaN-транзистора Qorvo TGF2942 [3] была смоделирована схема усилителя распределенного усиления и выполнена на пассивных LC-элементах (рис. 3).

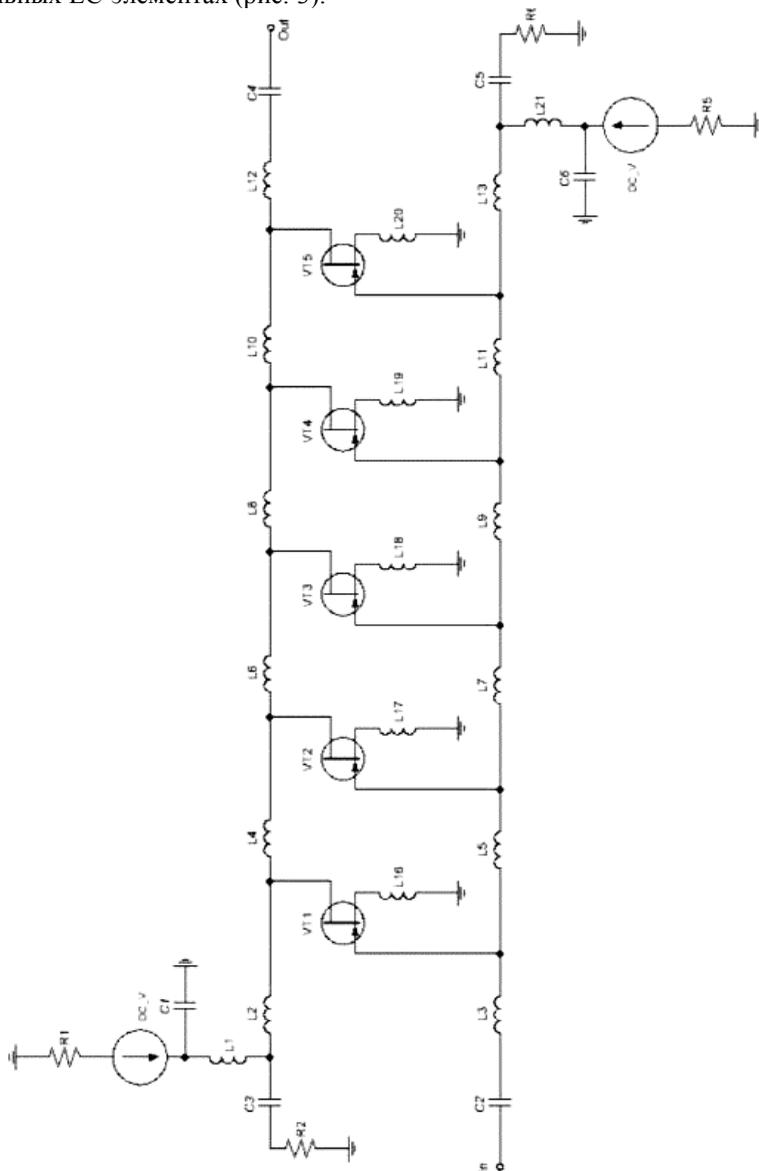


Рис. 3. Принципиальная схема усилителя распределенного усиления

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что коэффициент передачи УРУ  $S_{21}$  (см. рис. 2) имеет неравномерность не более 1,5 дБ во всем рабочем диапазоне частот, что, в свою очередь, сказалось на значениях выходной мощности по сжатию на 1 дБ (см. рис. 3), неравномерность характеристики которой составляет порядка 2 дБм. Во всем рабочем диапазоне частот 1–10 ГГц значение коэффициента устойчивости УРУ больше 1. В дальнейшем данный усилитель распределенного усиления планируется выполнить в микрополосковом исполнении для сравнения исследуемых характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Brecht Machiels, Distributed Amplification in CMOS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.mos6581.org/files/Brecht\\_Machiels\\_Distributed\\_Amplification\\_in\\_CMOS.pdf](https://www.mos6581.org/files/Brecht_Machiels_Distributed_Amplification_in_CMOS.pdf), свободный (дата обращения: 21.02.2022).
2. Микроэлектронные устройства СВЧ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.studmed.ru/veselov-gi-egorov-en-alehin-yun-i-dr-mikroelektronnye-ustroystva-svch\\_89844c6d936.html](https://www.studmed.ru/veselov-gi-egorov-en-alehin-yun-i-dr-mikroelektronnye-ustroystva-svch_89844c6d936.html), свободный (дата обращения: 26.02.2022).
3. Qorvo TGF2942 Data Sheet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.qorvo.com/products/p/TGF2942>, свободный (дата обращения: 12.02.2022).

УДК 378.14

### **ПРЕДОБРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОБУЧЕНИЯ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПРАВИЛЬНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА РАДИОЛОКАЦИОННОМ ИЗОБРАЖЕНИИ**

***В.И. Вебер, студент каф. РТС***

*Научный руководитель В.Ю. Куприц, доцент каф. РТС, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, vladweber00@gmail.com*

Рассматриваются предобработка базы данных радиолокационных изображений БТРов, танков и ЗИЛов из открытой базы данных Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition (MSTAR) и выбор параметров обучения сверточной нейронной сети с целью повышения вероятности правильного распознавания.

**Ключевые слова:** распознавание, сверточная нейросеть, радиолокационное изображение, обучающая выборка, база данных для обучения.

В задаче распознавания изображений в прошлом использовались различные структуры нейронных сетей, например, использовался

многослойный перцептрон. Но в 2010–2012 гг. произошел прорыв в сфере распознавания изображений, были изобретены сверточные нейросети. При использовании таких структур был выявлен значительный прирост вероятности правильного распознавания изображений с помощью нейронных сетей. На основе таких структур создается множество сетей, и прогресс не стоит на месте. В настоящее время алгоритмы «компьютерного зрения» (такие алгоритмы, в основе которых лежат сверточные нейронные сети) используются во многих различных структурах, таких как распознавание лиц, распознавание дорожных знаков, автопилотирование автомобиля и т.д.

В задаче распознавания образов на радиолокационном изображении, формируемом при помощи РСА (радиолокатор с синтезированной апертурой), также велись исследования по использованию нейросетевых структур, которые имели достаточный успех. В этой статье рассмотрены предобработка базы данных радиолокационных изображений и выбор параметров обучения сверточной нейронной сети с целью повышения вероятности правильного распознавания.

Структура сверточной нейронной сети распознавания объектов (три класса объектов: БТР, танк, ЗИЛ) на РЛИ (радиолокационном изображении) на основе сверточной нейронной сети показана на рис. 1.

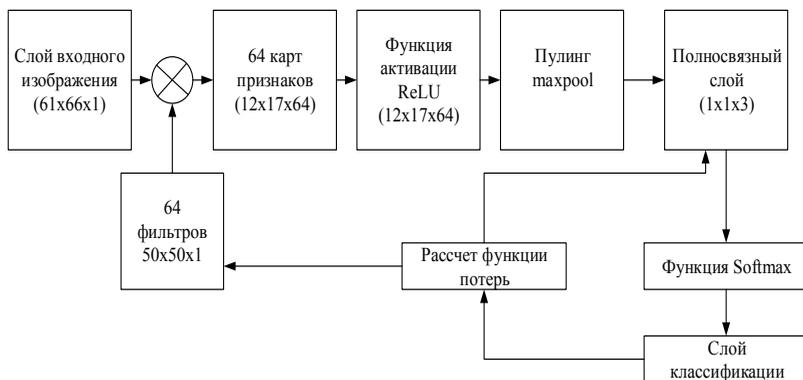


Рис. 1. Структура сверточной нейросети

Было произведено моделирование сверточной нейронной сети. Обучалась СНС на базе данных MSTAR, которая состояла из 1 620 изображений наземных объектов, из них по 500 изображений для обучения на каждый класс распознаваемых объектов (БТР, танк, ЗИЛ), 120 для валидации. Также были взяты из открытых источников радиолокационное изображение аэродрома и размещенные на нем распознаваемые объекты, примеры таких изображений даны на рис. 2.



Рис. 2. Пример РЛИ с расположением БТР

После этого с помощью алгоритма кластеризации выделялись объекты на сформированных изображениях (всего было выделено 118 из 120 изображений) и подавались на сверточную нейронную сеть. Примеры работы алгоритма кластеризации представлены на рис. 3.

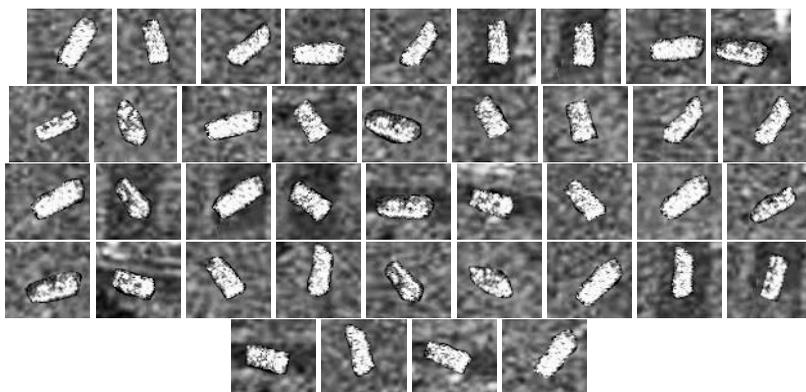


Рис. 3. Распознаваемые образы БТРов

Таким образом, была поставлена задача определить параметры обучения и оптимизировать обучающую выборку так, чтобы нейронная сеть правильно распознавала сформированные кластеры на РЛИ.

Изначальные параметры обучения представлены на рис. 4.

При обучении нейронной сети на исходной базе данных MSTAR была получена вероятность правильного распознавания не более 50%. Такой результат объясняется тем, что на тестовой выборке объекты имеют различные повороты.

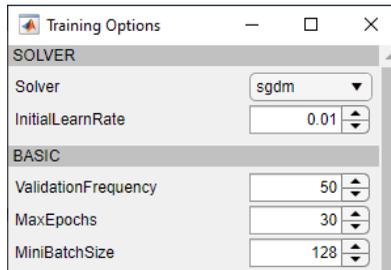


Рис. 4. Параметры обучения нейросетей для исследования зависимости правильного распознавания

При импорте базы данных для обучения и для валидации имеется возможность случайной ротации изображения по вертикали и горизонтали, по углу поворота, а также есть возможность зеркального отражения относительно осей абсцисс и ординат. Выбирая значения этих параметров, следует руководствоваться тем, что при слишком большом смещении или отклонении по углу существует возможность обрезать полезную информацию о цели. Проанализировав обучающую выборку, были выбраны следующие параметры:

- зеркальное отражение относительно осей;
- случайная ротация изображения по вертикали и горизонтали: от  $-6$  до  $+6$  пикселей;
- случайный поворот изображения: от  $-45$  до  $45^\circ$ .

Выставив эти параметры, были получены результаты, показывающие, что сеть не смогла обучиться. Валидация составила примерно 60%. Пример обучения нейросети изображен на рис. 5.



Рис. 5 (начало)

**Results**

Validation accuracy: 65.00%  
Training finished: Reached final iteration

**Training Time**

Start time: 01-Nov-2021 16:13:23  
Elapsed time: 34 sec

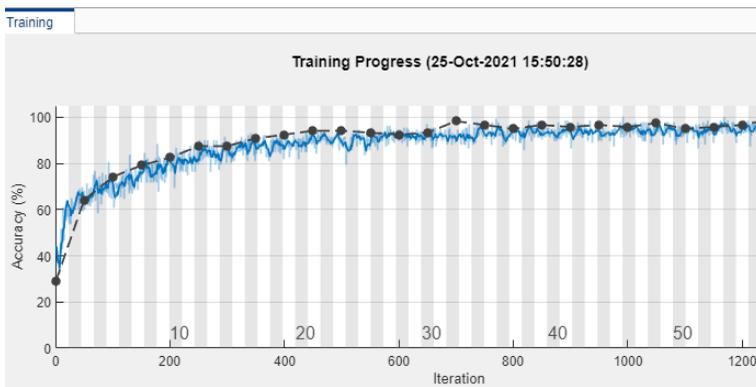
**Training Cycle**

Epoch: 30 of 30  
Iteration: 330 of 330  
Iterations per epoch: 11  
Maximum iterations: 330

**Validation**

Рис. 5 (продолжение). Обучение и валидация нейросети

Для улучшения процесса обучения необходимо определить параметры обучения (рис. 6).

**Results**

Validation accuracy: 97.50%  
Training finished: Reached final iteration

**Training Time**

Start time: 25-Oct-2021 15:50:28  
Elapsed time: 2 min 9 sec

**Training Cycle**

Epoch: 60 of 60  
Iteration: 1320 of 1320  
Iterations per epoch: 22  
Maximum iterations: 1320

**Validation**

Рис. 6. Обучение и валидация нейросети с заданными параметрами обучения

Анализируя литературу и видеолекции [5, 6], было принято решение об увеличении количества эпох в два раза, т.е. до 60 (каждая эпоха содержит всю обучающую выборку), это позволит воспроизвести всевозможные повороты и отклонения, которые соответствуют заданным выше параметрам. Также следует уменьшить скорость обучения до 0,001, что означает уменьшить величину поправок в ядра фильтра.

В результате обучения сети при таких параметрах, валидация составила 97,5%. Вероятность правильного распознавания тестовой выборки возросла с 50 до 92,3%.

### **Выводы**

1. Предобработка данных для обучения сверточной нейронной сети позволяет существенно улучшить качество распознавания наземных объектов.

Например, при добавлении смещения и поворота в обучающую выборку качество распознавания возросло с 50 до 92,3%.

2. Выбор параметров обучения для нейронной сети необходим для организации и проведения корректного обучения, без определения параметров нейронная сеть не сможет обучиться.

Например, определив параметры для обучения, стало возможным провести обучение на новой выборке со смещением и поворотом.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Школьный Л.А. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учеб. для курсантов ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского / Л.А. Школьный и др.; под ред. Л.А. Школьного. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 531 с.

2. Наглядное введение в нейросети на примере распознавания цифр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pvsm.ru/python/270162/print/> (дата обращения: 15.01.2021).

3. Сверточная сеть на python. – Ч. 1: Определение основных параметров модели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://proglab.io/p/neural-network-course> (дата обращения: 15.01.2021).

4. MSTAR Dataset [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sdms.afrl.af.mil/index.php?collection=mstar>

5. Gopi E.S. Pattern Recognition and Computational Intelligence Techniques Using Matlab. – Department of Electronics & Communications Engineering National Institute of Technology Trichy Tamil Nadu, India, 2020. – 263 p.

6. Князь В.А. Автоматическое распознавание целей на основе глубокого обучения в задачах самонаведения авиационных средств поражения. – ФГУП «ГосНИИАС», 2019. – 11 с.

## **ПОДСЕКЦИЯ 1.4**

### **ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

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

УДК 004.932.72'1

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ МОДУЛЯ POSENET НА МИКРОКОМПЬЮТЕРЕ JETSON NANO**

***В.С. Чебанов, студент каф. ТУ***

*Научный руководитель В.В. Капустин, доцент каф. ТУ, к.т.н.  
Проект ГПО ТУ-1901. Исследование и разработка методов  
и средств распознавания изображений активно-импульсных  
телевизионных измерительных систем  
г. Томск, ТУСУР, victorchebanov1@gmail.com*

Представлен сравнительный анализ времени, затрачиваемого на детектирование частей тела моделью PoseNet в зависимости от порога обнаружения и разрешения изображения. Исследуется детектирование изображения с одним человеком, а также со скоплением людей.

**Ключевые слова:** микрокомпьютер Jetson Nano, PoseNet, Hello World AI, обнаружение.

Библиотека Hello World AI для Jetson создана компанией NVIDIA, где библиотека использует утилиту NVIDIA TensorRT для эффективного развертывания нейронных сетей на встроенной платформе Jetson, повышения производительности и энергоэффективности за счет оптимизации. TensorRT представляет собой специализированную структуру, которая максимально утилизирует производительность видеокарты для нейронных сетей, также стоит отметить, что она включает в себя оптимизатор вывода глубокого обучения и среду выполнения, которая обеспечивает низкую задержку и высокую пропускную способность для приложений вывода глубокого обучения. Библиотека содержит несколько модулей, для детектирования частей тела используется модуль PoseNet.

Детектирование относится к методам компьютерного зрения, которые обнаруживают человеческие фигуры на изображениях и видеопоследовательностях, чтобы можно было определить, например,

где на изображении виден «чей-то локоть». Важно помнить о том, что детектирование просто оценивает ключевые суставы тела и не распознает, кто находится на изображении или в видеопотоке [1].

Модели детектирования принимают обработанное изображение камеры в качестве входных данных и выводят информацию о ключевых точках. Детектирование имеет множество применений: от интерактивных инсталляций, которые реагируют на тело, до дополненной реальности, анимации, фитнеса и многого другого [2].

Детектирование состоит из определения различных частей тела (также известных как ключевые точки), которые образуют топологию скелета. Предусмотрены предварительно обученные модели для оценки позы человеческого тела и рук, которые способны обнаруживать несколько людей за один кадр. При работе PoseNet входными данными является изображение, а на выходе является изображение с выделенными объектами, содержащими расположение на объекте ключевых точек, а также их расположение и связи между ключевыми точками [3].

Рассмотрим работу PoseNet на одном человеке, стоящем анфас, в разрешении  $4000 \times 3000$  и  $1280 \times 960$  элементов при пороге обнаружения по умолчанию (рис. 1).

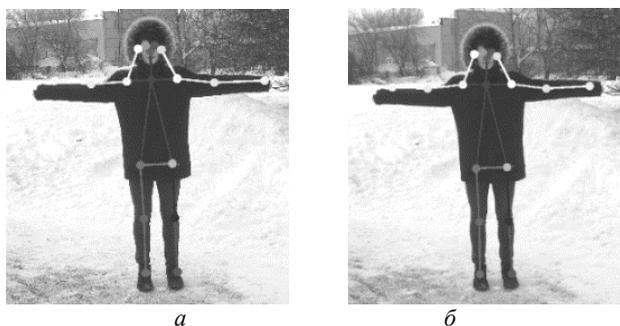


Рис. 1. Полученные изображения после обработки:  
*a* –  $4000 \times 3000$  элементов, *б* –  $1280 \times 960$  элементов

На полученном изображении видно, что детектирование прошло успешно, однако стоит отметить, что возможны погрешности из-за верхней одежды. При пороге обнаружения по умолчанию было выделено 18 ключевых точек. Затраченное время на обработку изображений представлено в табл. 1.

Исследуем результат работы модели при изменении порога обнаружения с 0,15 до 0,5 (рис. 2).

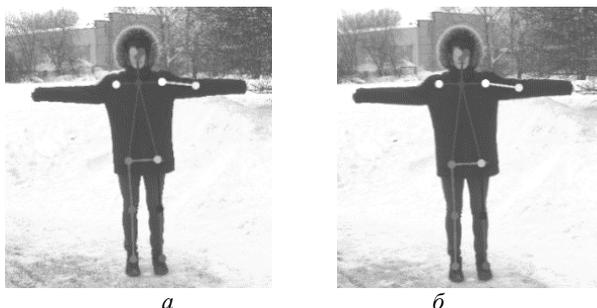


Рис. 2. Изображения получены при другой позе после обработки:  
*a* – 4000×3000 элементов, *б* – 1280×960 элементов

Изменение порога обнаружения привело к тому, что ключевые точки и линии на руках не были построены. Качество детектирования не изменяется при изменении качества изображения. При пороге обнаружения, равном 0,5, результатом является выявление 13 ключевых точек. Время, затраченное на обработку изображений, дано в табл. 1.

Таблица 1

**Время, затраченное на обработку изображений с одним человеком**

Разрешение изображения, элементов	При пороге обнаружения по умолчанию, 0,15 мс	При пороге обнаружения 0,5, мс
4000×3000	139	146
1280×960	61	60

Изучив работу модели на одном человеке, исследуем ситуацию с детектированием частей тела при множестве людей на изображении.



Рис. 3. Изображения, полученные при скоплении людей, после обработки:  
*a* – порог обнаружения 0,15; *б* – порог обнаружения 0,5

В случаях скопления людей детектирование допускает большое количество ошибок, строя неправильные ключевые точки, даже строя один скелет по ключевым точкам нескольких людей. При изменении порога количество ключевых точек заметно сокращается. Используя порог обнаружения по умолчанию, было выявлено 52 ключевые точки, при повышении порога до 0,5 количество точек сократилось до 15. Затраченное время на обработку изображений представлено в табл. 2.

Таблица 2

**Время, затраченное на обработку изображений со скоплением людей**

Разрешение изображения, элементов	При пороге обнаружения по умолчанию, 0,15 мс	При пороге обнаружения 0,5 мс
3264×2448	164	146
1280×960	168	161

Результатом исследования модели PoseNet является то, что значительное повышение порога обнаружения приводит к неполному детектированию конечностей. При скоплении людей происходит наложение ключевых точек одного скелета на двух человек. Время, затраченное на обработку, сокращается при уменьшении разрешения изображения с одним человеком, но практически не меняется для изображения группы людей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Pose estimation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.tensorflow.org/lite/examples/pose\\_estimation/overview](https://www.tensorflow.org/lite/examples/pose_estimation/overview), свободный (дата обращения: 15.03.2022).

2. Coral PoseNet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/google-coral/project-posenet>, свободный (дата обращения: 14.03.2022).

3. Pose Estimation with PoseNet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/dusty-nv/jetson-inference/blob/master/docs/posenet.md>, свободный (дата обращения: 13.03.2022).

УДК 004.932.4

### **ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛГОРИТМОВ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

**З.Б. Чимитов, магистрант**

*Научный руководитель В.В. Капустин, доцент каф. ТУ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, [chimitov.zandan2015@yandex.ru](mailto:chimitov.zandan2015@yandex.ru)*

Описывается сравнение эффективности работы алгоритмов для масштабирования цифровых изображений с использованием

нейронных сетей, таких как SRGAN и SRResNet, с классическими методами интерполяции (метод ближайшего соседа, билинейная интерполяция, бикубическая интерполяция, интерполяция Ланцоша).

**Ключевые слова:** нейронные сети, интерполяция, SRGAN, SRResNet, Python, Tensorflow.

Одним из важнейших вопросов, связанных с распознаванием образов, является задача повышения разрешения изображений (super-resolution). Известно множество различных подходов к решению этой проблемы, в данной работе будут рассматриваться два алгоритма Super Resolution GAN (SRGAN) и Super Resolution ResNet (SRResNet). В работе обучения нейронных сетей возникла проблема снижения точности обучения, чтобы решить эту проблему, Microsoft ввела глубокую «остаточную» структуру обучения SRResNet. В отличие от других GAN-сетей в SRGAN перед разверточными слоями добавляется пара сверточных слоев, отвечающих за то, чтобы первоначально исходное изображение декомпозировать на признаки, а затем уже благодаря последующим преобразованиям превратить полученные свойства в изображение большего разрешения.

Проведем сравнение работы двух алгоритмов повышения качества изображения SRGAN и SRResNet, а также классических методов интерполяции (метод ближайшего соседа, билинейная интерполяция, бикубическая интерполяция, интерполяция Ланцоша).

Для реализации методов был использован фреймворк глубокого машинного обучения Tensorflow версии 2.7.0 на языке программирования Python версии 3.8 [1].

Первым этапом было проведено обучение моделей нейросетей SRGAN и SRResNet [2]. Для обучения использовался готовый набор данных RGB изображений высокого качества DIV2K, состоящий из 800 изображений для обучения, 100 изображений для валидации и 100 изображений для тестирования [3].

Далее производился запуск обученной модели. Использовалось тестовое изображение разрешением 1280×800 пикселей, предварительно уменьшенное в 4 раза (до 320×200). Для оценки эффективности алгоритма используется библиотека OpenCV.

Далее проведем сравнение с классическими методами интерполяции, для этого также используется библиотека OpenCV содержащая в себе метод ближайшего соседа (cv2.INTER\_NEAREST), билинейный метод (cv2.INTER\_LINEAR), бикубический метод (cv2.INTER\_CUBIC), а также метод интерполяции Ланцоша (cv2.INTER\_LANCOZ4) [4]. Результат сравнения методов представлен ниже (рис. 1).

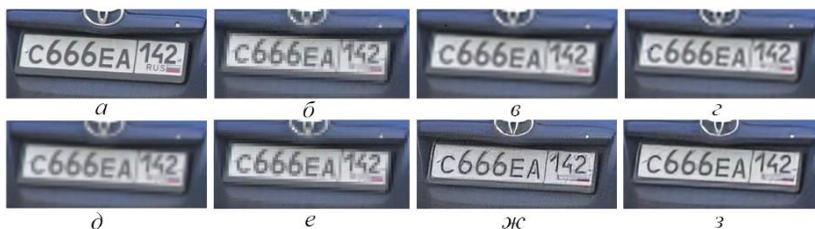


Рис. 1. Сравнение результатов: *а* – эталонное изображение; *б* – исходное изображение, уменьшенное в 4 раза; *в* – бикубическая интерполяция; *г* – интерполяция Ланцоша; *д* – билинейная интерполяция; *е* – метод ближайшего соседа; *ж* – SRGAN-модель; *з* – SRResNet-модель

Для оценки качества изображений, полученных в результате работы исследуемых алгоритмов, использовались такие метрики как *MSE* (1), *PSNR* (2) и *SSIM* (3)

$$(1)$$

где  $N_1, N_2$  – размер изображений в пикселях,  $M_0, M$  – матрицы яркостей исходного и искаженного изображений соответственно;

$$(2)$$

где  $MAXI$  – максимально возможное значение пикселей на изображении  $I$

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c1)(2\sigma_{xy} + 2c)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 2c)}, \quad (3)$$

где  $\mu_x$  – среднее изображения  $x$ ;  $\mu_y$  – среднее изображения  $y$ ;  $\sigma_x^2$  – дисперсия изображения  $x$ ;  $\sigma_y^2$  – дисперсия изображения  $y$ ;  $\sigma_{xy}$  – ковариация изображений  $x$  и  $y$ ;  $c1, c2$  – некоторые константы.

В таблице приведены результаты исследования алгоритмов.

#### Результаты измерений значений метрик

Алгоритм обработки	<i>MSE</i>			<i>PSNR</i>			<i>SSIM</i>
	red	green	blue	red	green	blue	
CUBIC	82,641	78,782	76,638	28,958	29,166	29,291	0,853
LANCZOC	79,541	76,260	74,198	29,124	29,307	29,426	0,853
LINEAR	105,119	99,690	96,736	28,113	28,144	28,271	0,853
NEAREST	160,215	154,906	151,251	26,183	26,230	26,283	0,853
SRGAN	114,974	101,535	105,811	28,014	28,064	28,114	0,853
SRResNet	68,913	53,833	57,711	30,015	30,030	30,045	0,865

Из анализа полученных данных *MSE*, *PSNR* и *SSIM* можно сделать вывод, что модель SRResNet повышает разрешение изображений наиболее качественно, но примерно на одном уровне с классическими методами интерполяции. Тем не менее на рис. 1 отчетливо наблюдается, что изображение, обработанное моделями SRGAN и SRResNet, имеет лучшую детализацию. В результатах работы трех методов интерполяции прослеживаются относительно одинаковые показания структурного сходства –  $SSIM = 0,85$ , когда для метода ближайшего соседа показания  $SSIM = 0,77$ . Также в отличие от других результатов на рис. 1 отчетливо наблюдается эффект «лесенки».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Image Super-Resolution using SRResNet and SRGAN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/jlaihong/image-super-resolution> (дата обращения: 12.12.2021).

2. Photo-Realistic Single Image Super-Resolution Using a Generative Adversarial Network by Christian Ledig, Lucas Theis, Ferenc Huszar, Jose Caballero, Andrew Cunningham, Alejandro Acosta, Andrew Aitken, Alykhan Tejani, Johannes Totz, Zehan Wang, Wenzhe Shi [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1609.04802.pdf> (дата обращения: 12.12.2021).

3. NTIRE 2017 Challenge on Single Image Super-Resolution: Dataset and Study, Eirikur Agustsson CVL, ETH Zurich, Switzerland: aeirikur@vision.ee.ethz.ch, Radu Timofte CVL, ETH Zurich & Merantix GmbH: radu.timofte@vision.ee.ethz.ch [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://data.vision.ee.ethz.ch/cvl/DIV2K/> (дата обращения: 12.12.2021).

4. OpenCV – сравнение алгоритмов интерполяции при изменении размеров изображения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://robocraft.ru/blog/computervision/3956.html> (дата обращения: 12.12.2021).

УДК 004.932.4

### РАЗРАБОТКА ДВУМЕРНОГО РЕКУРСИВНО-СЕПАРАБЕЛЬНОГО ПЯТИКАСКАДНОГО ФИЛЬТРА ПОВЫШЕНИЯ ЧЕТКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*М.А. Комарницкий, магистрант*

*Научный руководитель А.В. Каменский, доцент каф. ТУ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, m.kimarnitskii@mail.ru*

Представлен алгоритм построения двумерного пятикаскадного фильтра повышения четкости изображения, продемонстрирована итоговая маска коэффициентов фильтра, разработана структурная схема, приведены примеры обработки изображений спроектированным фильтром.

**Ключевые слова:** цифровая обработка изображений, двумерные фильтры, алгоритм.

**Описание алгоритма построения фильтра.** Проектирование фильтра начинается с создания маски. Так как фильтр пятикаскадный, для его формирования будут использованы пять строчных и пять кадровых рециркуляторов. На вход подается изображение, описываемое единицей, необходимое для демонстрации маски разработанного фильтра, затем оно подвергается процессу свертки.

После этого маска подается на сумматор с противоположным знаком. В результате свертки формируется маска размером  $7 \times 7$  элементов, она является основой для итоговой маски и подвергается дальнейшим изменениям (рис. 1).

-1	-5	-11	-14	-11	-5	-1
-11	-25	-55	-70	-55	-25	-5
-11	-55	-121	-154	-121	-55	-11
-14	-70	-154	-196	-154	-70	14
-11	-55	-121	-154	-121	-55	11
-11	-25	-55	-70	-55	-25	5
-1	-5	-1	-14	-11	-5	1

Рис. 1. Маска  $7 \times 7$  на первом этапе построения

Для корректной работы фильтра необходимо, чтобы сумма центральной и внешней областей масок была равна нулю [1]. С целью достижения суммы, равной нулю, требуется сформировать дополнительную маску. В данной маске центр имеет размерность  $3 \times 3$ , следовательно, для начала нужно применить маску к центру так, чтобы сохранить пропорции коэффициентов и добиться такой их суммы, чтобы вместе с суммой внешних коэффициентов они давали ноль [2].

Методом подбора получаем маску  $3 \times 3$ , которая при сумме с центральной маской  $3 \times 3$  компенсирует суммы внешних коэффициентов, такую маску дает коэффициент 144 (рис. 2).

144	288	144
288	576	288
144	288	144

Рис. 2. Маска  $3 \times 3$

Затем полученная матрица складывается с центральной матрицей, и формируется матрица фильтра  $7 \times 7$  элементов (рис. 3).

-1	-5	-11	-14	-11	-5	-1
-11	-25	-55	-70	-55	-25	-5
-11	-55	23	134	23	-55	-11
-14	-70	134	380	134	-70	-14
-11	-55	23	134	23	-55	-11
-11	-25	-55	-70	-55	-25	-5
-1	-5	-11	-14	-11	-5	-1

Рис. 3. Итоговая маска фильтра 7×7

**Проектирование структурной схемы фильтра.** В данном случае фильтр будет иметь три ветви. Средняя ветвь отвечает за формирование непосредственно самой маски фильтра, верхняя ветвь необходима для формирования корректирующей маски, а нижняя осуществляет сдвиг к центральному элементу матрицы (рис. 4).

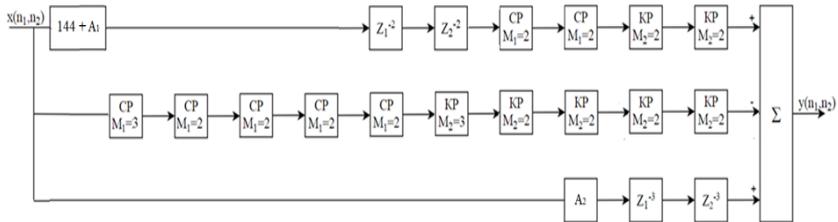


Рис. 4. Структурная схема фильтра

**Обработка тестового изображения.** В качестве примера изображения было выбрано изображение, сформированное в условиях плохой видимости (рис. 5).

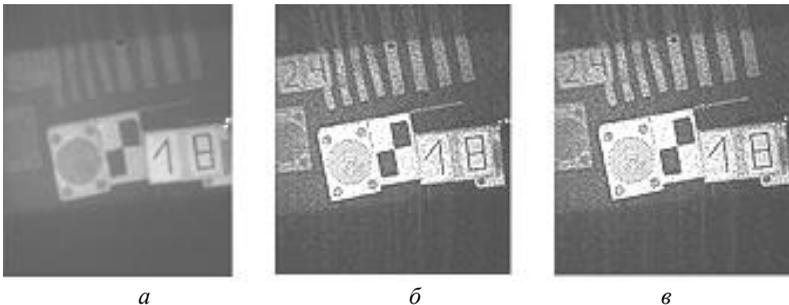


Рис. 5. Обработка тестового изображения разработанным фильтром: исходное изображение – а; обработанное коэффициентом  $A_1 = 6$  – б; обработанное коэффициентом  $A_2 = 25$  – в

**Заключение.** Итоговый алгоритм представляет собой формирование маски  $7 \times 7$  с положительной апертурой  $3 \times 3$ . В фильтре присутствуют коэффициенты, которые играют роль корректора значений элементов маски. Так, первый коэффициент производит подъем центрального элемента на некоторое значение, а второй коэффициент аналогичное действие производит с центральной частью. Это служит для корректировки обработки изображения в зависимости от требований. Исходя из результатов тестовой обработки, можно сделать вывод, что разработанный фильтр действительно повышает четкость изображения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сай С.В. Современные методы анализа и повышения качества цифровых изображений / С.В. Сай, А.В. Каменский, М.И. Курячий. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2020. – 173 с.
2. Каменский А.В. Рекурсивно-сепарабельные двумерные цифровые фильтры обработки телевизионных изображений / А.В. Каменский, М.И. Курячий // Изв. Юго-Западного гос. ун-та. – Сер.: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – Курск, 2018. – Т. 8, № 4(29). – С. 25–33.

УДК 004.932.4

**ОЦЕНКА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ДВУМЕРНОГО  
РЕКУРСИВНО-СЕПАРАБЕЛЬНОГО ПЯТИКАСКАДНОГО  
ФИЛЬТРА ПОВЫШЕНИЯ ЧЕТКОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**  
*М.А. Комарницкий, магистрант; А.В. Каменский, доцент, к.т.н.*  
*г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, m.kimarnitskii@mail.ru*

Произведено сравнение быстродействия классического алгоритма двумерной свертки и рекурсивно-сепарабельного пятикаскадного фильтра повышения четкости изображения.

**Ключевые слова:** цифровая обработка изображений, двумерные фильтры, алгоритм, быстродействие.

С ростом уровня технологий появляется новая задача, по сохранению эффективной обработки изображений при уменьшении количества вычислительных операций, другими словами, на первый план выходит быстродействие фильтра. Двумерные фильтры используются во множестве различных областей, одна из них – это повышение качества или реставрация изображений в задачах, связанных с обнаружением контуров, фильтрация с целью уменьшения влияния шумов на изображение рекурсивно-сепарабельных фильтров [1].

При построении РСЦФ часто используются рециркуляторы, так как они позволяют на базе однотипных звеньев реализовать широкий класс двумерных фильтров [2].

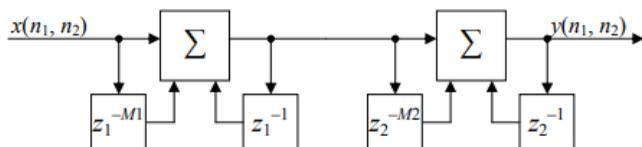


Рис. 1. Линейная комбинация рециркуляторов

Исследуемый фильтр представляет собой комбинацию пяти строчных и пяти кадровых рециркуляторов, при этом итоговая маска фильтра представлена на рис. 2.

-1	-5	-11	-14	-11	-5	-1
-11	-25	-55	-70	-55	-25	-5
-11	-55	23	134	23	-55	-11
-14	-70	134	380	134	-70	-14
-11	-55	23	134	23	-55	-11
-11	-25	-55	-70	-55	-25	-5
-1	-5	-11	-14	-11	-5	-1

Рис. 2. Итоговая маска фильтра

**Оценка быстродействия фильтра.** Для оценки быстродействия использовалась среда программирования MatLab, в которой был написан алгоритм, позволяющий оценить быстродействие фильтра.

Оценка проводилась между алгоритмом классической двумерной свертки (КДС) и спроектированным двумерным рекурсивно-сепарабельным пятикаскадным двумерным фильтром (ПДРСФ).

Для первого эксперимента было выбрано изображение разрешением  $640 \times 480$  элементов формата .tif, исходя из значений, представленных в табл. 1, установлено, что ПДРСФ обработал изображение быстрее, чем КДС, в 2,19 раза при использовании MatLab и в 4,16 раза при использовании алгоритма C++ (МЕХ-функции), для второго эксперимента использовалось изображение разрешением  $5616 \times 3744$  элементов, исходя из табл. 2, выигрыш составил 1,6 раза при использовании алгоритма MatLab, а при использовании МЕХ-функции – 2,09 раза.

**Заключение.** При использовании разработанного алгоритма в среде программирования MatLab для изображения разрешением  $640 \times 480$  элементов формата tif ПДРСФ обработал изображение быстрее, чем КДС, в 2,19 раза при использовании алгоритма MatLab и в

4,16 раза при использовании алгоритма C++ (МЕХ-функции), при заданном изображении 5616×3744 элементов алгоритм ПДРСФ быстрее, чем КДС, в 1,6 раза при обычной реализации на MatLab, при реализации через МЕХ-функцию ПДРСФ формирует изображение быстрее КДС в 2,09 раза.

Таблица 1

**Результаты для изображения 640×480 элементов**

№ изменения	Время обработки, с			
	Функция в MatLab		Компилированная МЕХ-функция	
	КДС	ПДРСФ	КДС	ПДРСФ
1	1,4681	0,7191	1,4416	0,3597
2	1,6491	0,7383	1,5379	0,3883
3	1,6516	0,7431	1,4130	0,3752
4	1,4883	0,7463	1,4465	0,3780
5	1,5432	0,7310	1,4267	0,3748
6	1,6711	0,7365	1,4136	0,3779
7	1,4249	0,7514	1,4235	0,3748
8	1,8959	0,7353	1,5229	0,3779
9	1,8815	0,7216	1,5420	0,3765
10	1,4469	0,7453	1,5115	0,4003
СЗ	1,6120	0,7367	1,4679	0,3834

Таблица 2

**Результаты для изображения 5616×3744 элементов**

№ изменения	Время обработки, с			
	Функция в MatLab		Компилированная МЕХ-функция	
	КДС	ПДРСФ	КДС	ПДРСФ
1	128,5907	77,7197	117,8797	59,6770
2	120,0579	76,2334	112,3904	53,1586
1	128,5907	77,7197	117,8797	59,6770
2	120,0579	76,2334	112,3904	53,1586
3	122,6137	73,9100	111,1342	53,1187
4	120,5765	74,8967	110,5755	52,4274
5	124,3192	74,0164	111,5946	54,0955
6	123,3740	74,8574	111,0826	52,1576
7	127,4568	73,5648	111,3714	53,6887
8	124,5422	74,9878	111,8952	53,9087
9	125,7644	73,6778	110,5550	52,0076
10	120,7536	75,8755	110,7791	52,5602
СЗ	123,804	74,9739	111,9258	53,6706

Исходя из проведенной оценки быстродействия, можно сделать вывод что разработанный двумерный пятикаскадный фильтр является

более быстродействующим, использование ПДРСФ является более выгодным, чем фильтр с использованием классической двумерной свертки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хуанг Т.С. Обработка изображений и цифровая фильтрация. – М.: Мир, 1979. – 320 с.
2. Курячий М.И. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. – Томск, 2002. – 100 с.

УДК 621.396.41

### ИССЛЕДОВАНИЕ БИМЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

*А.С. Красноперова, Ю.В. Ильин, студенты;*

*А.В. Каменский, доцент, к.т.н.*

*Проект ГПО ТУ-2002. Исследование и разработка методов анализа и обработки фото- и видеоданных в телевизионных измерительных системах  
г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ, alenacergeevna@icloud.com*

Рассмотрены требования к процессу получения медицинских изображений для определения отклонений в движениях суставов. Для автоматизированной системы измерения отклонения положений в суставах требуется знать параметры движения здорового сустава человека и его границы, несоответствие которым свидетельствует об отклонении от нормального движения сустава.

**Ключевые слова:** эндопротезирование, лучезапястный сустав, обработка изображения, оценка движений.

Важным понятием в медицинской диагностике является медицинское изображение, поскольку с помощью него осуществляется диагностика заболевания и изучение анатомо-функциональной картины организма. Основные источники для получения таких изображений – методы лучевой диагностики: рентгенологический, магнитно-резонансный, радионуклидный и ультразвуковой [1]. Изображения, полученные с помощью этих методов, могут быть зашумлены, в результате чего их анализ усложнится.

Для того чтобы системы распознавания объектов имели возможность определять ограничения движений в суставах, необходимо соблюдать требования к съемке медицинских изображений суставов, основанные на оценке амплитуды движений в суставе [2].

За основу измерения объема движений в суставах принята описательная и динамическая анатомия человека и использован единый принцип измерения угла: измеряется угол между дистальной (по-

движной) частью конечности и проксимальным (неподвижным) ей отделом. Для оценки движения кисти существуют упражнения, приведённые на рис. 1, и критерии оценки движения в лучезапястном суставе, приведённые в таблице.

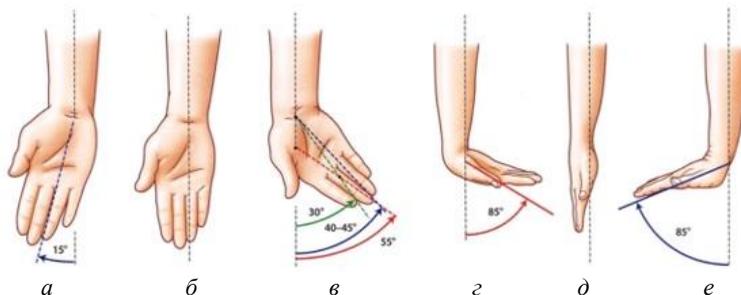


Рис. 1. Отведение, внутренняя часть ладони к внутренней части предплечья – а; нейтральное положение – б; приведение, внешняя сторона ладони к внешней стороне предплечья – в; сгибание – г; нейтральное положение – д; разгибание – е

#### Критерии оценки движения в лучезапястном суставе

Движение (до предельно возможного угла)	Норма, градус	Ограничение движения		
		Незначительное	Умеренное	Значительное
Сгибание	80–36	35–26	25–16	15 и меньше
Разгибание	95–31	30–26	25–16	15 и меньше
Радиальное	30–11	10–6	5–4	3 и меньше
Ульнарное	45–26	25–16	15–11	10 и меньше

Проведя анализ таблицы и упражнений, приведенных на рис. 1, можно сделать выводы, что для формирования базы тестовых видеозаписей движений сустава кисти следует выполнять ряд требований:

1. Положение камеры перпендикулярно к плоскости ладони.
2. Два положения съемки: А – рука ладонью вверх; Б – рука тыльной стороной вверх.
3. Начало съемки осуществлять строго из нейтрального положения, при изменении положения избегать резких движений, движения делать до предельно возможного.
4. Дублировать съемку на обе руки.

Для улучшения визуального качества изображений (фильтрации помех и шумов) используется метод Канни. Необходимой процедурой для метода является предобработка изображений с целью повышения

их качества. В данном случае применяется обработка фильтром Гаусса [3].

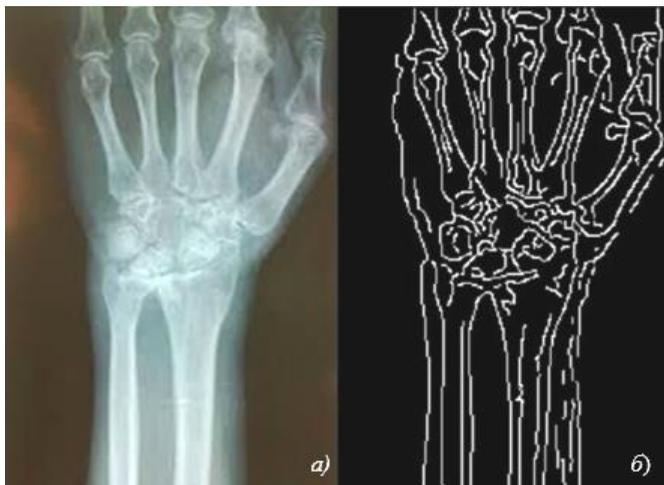


Рис. 2. Пример зашумлённого (а) и обработанного (б) изображений

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что для дальнейшей работы требуется создание алгоритма, включающего в себя три этапа:

1. Предобработка изображения методом Гаусса.
2. Нахождение границ методом Канни.
3. Определение особых точек детекторами углов, такими как Moravec, Harris, Трајkovic.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сай С.В., Каменский А.В., Курячий М.И. Современные методы анализа и повышения качества цифровых изображений. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2020. – 173 с.
2. Ходкевич И.А., Бояркин С.Е. Предобработка медицинских изображений // Сборник избр. статей научной сессии ТУСУР–2021: матер. конф., Томск, 2021. – С. 77–80.
3. Детектор границ Канни (ресурс для IT-специалистов) [Электронный ресурс]. – URL: <https://habr.com/ru/post/114589/> (дата обращения: 5.03.2022).

## ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ ВИДЕОКАМЕР И ЦВЕТОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ МОНИТОРОВ

*К.А. Аневалов, Р.Е. Макажанов, магистранты*

*Научный руководитель М.И. Курячий, доцент каф. ТУ, к.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, каф. ТУ kur@tu.tusur.ru,*

Выполнен аналитический обзор характеристик цветопередачи ПЗС камер стандартной четкости, характеристики цветопередачи КМОП камеры смартфона в программной среде ПО Imatest. Калибровку видеокамер возможно выполнить с использованием цветового профиля откалиброванного монитора.

**Ключевые слова:** характеристики цветопередачи, видеокамера, преобразование, стандартная четкость, цветовое воспроизведение, цветовой профиль, калибровка, монитор.

Программный модуль Multicharts производит анализ нескольких изображений тестовых диаграмм для цветной точности, тонального ответа и чувствительности ISO [1] и использует для этого интерактивный пользовательский интерфейс. Данный модуль применяется также, чтобы измерить баланс белого и спектральную чувствительность для широкого диапазона условий освещения и сцен [2]. На рис. 1 представлено тестовое изображение для оценки качества цветопередачи видеокамеры.



Рис. 1. Тестовое изображение

На рис. 2 представлены снимки тестовой таблицы ПЗС-камерой стандартной четкости. Снятый на камеру высокого разрешения «Digital CCD Camera 9000SCH», 6-мегапиксельная, объектив 25 мм, размер матрицы 1/3, тип матрицы CCD, фокусное расстояние 4–9 мм.

Снимок тестовой таблицы КМОП-камерой смартфона iPhone 11, где установлен блок двойной видеокамеры: 12-мегапиксельная основная камера с фокусным расстоянием 26 мм и диафрагмой f/1,8. Размер сенсора составляет 1/2,55 дюйма.



ПЗС-камерой стандартной четкости

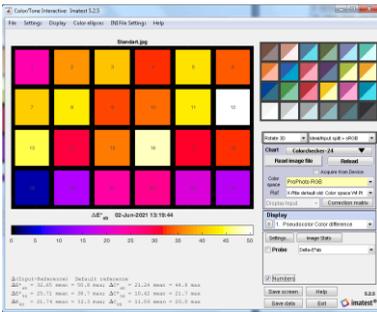


КМОП-камерой смартфона

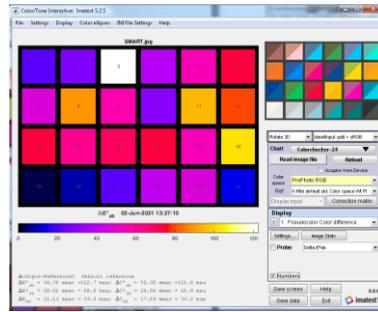
Рис. 2. Снимок тестовой таблицы

Цветовое различие псевдоцветов, представленное на рис. 3, между идеальным и входными участками цвета для камеры стандартной четкости и камеры смартфона может использовать любую из нескольких метрик, а также карту цветов. При условии, что матрица коррекции цвета была вычислена, различие между исходным и исправленными участками изображения будет отображаться в нижней части экрана. Масштаб псевдоцветов показан с прилегающим изображением.

Геометрическое расстояние  $\Delta E^*_{ab}$ , в  $L^*a^*b^*$  в пространстве наиболее известно, но  $\Delta E^*_{94}$ , которое используется для различий в цветности хроматических цветах (с большим  $a^*2 + b^*2$ ), может быть одной из лучших мер визуального цветового различия. Довольно-таки просто коррелировать  $\Delta E^*$  метрики с визуальными цветовыми различиями, используя [3].



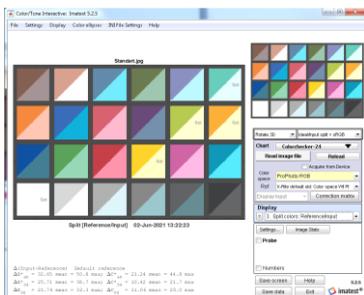
Стандарт



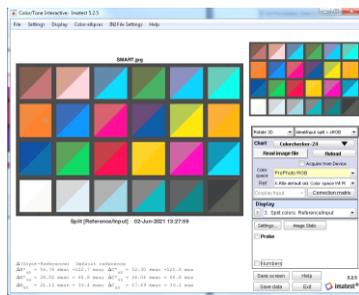
Смартфон

Рис. 3. Цветовое различие псевдоцвета

Цвета разделения, представленные на рис. 4, выводят на экран синтезируемое изображение диаграммы с разделением каждого цветового участка, таким образом, идеальное значение находится в верхнем левом углу и измеренное значение при вводе находится в нижнем правом углу. При условии, что матрица коррекции цвета была вычислена, исправленные цвета показаны в нижней части экрана [4].



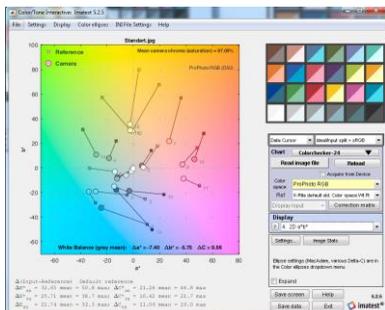
ПЗС-камеры стандартной четкости



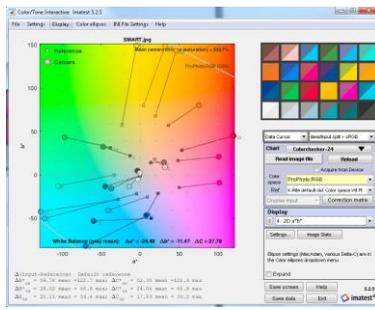
КМОП-камеры смартфона

Рис. 4. Цвета разделения

Ошибка цвета, представленная на рис. 5, показывает результат, полученный на участке CIELAB  $a^*b^*$  плоскости, где  $a^*$  – горизонтальная ось, а  $b^*$  – вертикальная ось. Квадраты являются идеальным ( $a^*$ ,  $b^*$ ) значением ColorChecker, которые были установлены с помощью эталонной настройки ColorChecker выше. Круги – это значения ( $a^*$ ,  $b^*$ ) фактического измеренного ColorChecker.



ПЗС-камеры стандартной четкости



КМОП-камеры смартфона

Рис. 5. Ошибка цвета

Для оценки качества цветопередачи видеокамеры можно использовать устройство визуализации цветного изображения. При помощи устройства SpyderXElite (рис. 6) производим калибровку цветового профиля монитора, далее выводим тестовую таблицу на монитор, производим оценку качества видеокамеры и при необходимости контролируем видеокамеру на баланс белого и характеристики цветопередачи.

Принцип работы данного устройства заключается в следующем: оценивая цветопередачу на экране, оно сравнивает полученный результат со стандартной шкалой цветов. С помощью устройства можно

создавать цветовой профиль, а в дальнейшем система будет использовать именно этот набор настроек, при этом наиболее правильно отражая цвета на дисплее. Есть расширенный анализ цветовых характеристик монитора, который дополнительно определит точность цветопередачи и равномерность подсветки по 9 зонам. Режим StudioMatch может согласовать характеристики мониторов и привести их к одинаковому качеству цветопередачи [5].



Рис. 6. Калибратор монитора

Проведена экспериментальная калибровка монитора для оценки его характеристик цветовоспроизведения, которая показала возможность его использования в качестве эталонного прибора для оценки характеристик цветопередачи видеокамер. На рис. 7 представлена оценочная характеристика в цветовом пространстве CIELAB.

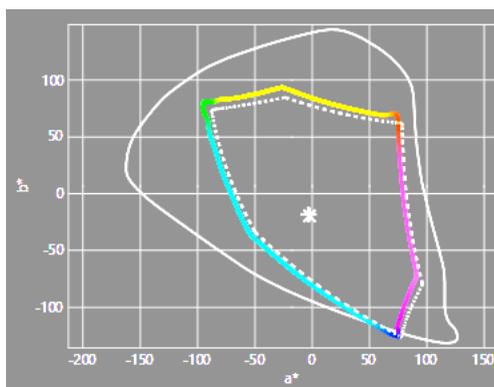


Рис. 7. Характеристика в цветовом пространстве CIELAB

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Компьютерный портал «Imatest» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.imatest.com/docs> (дата обращения: 03.02.2022).
2. Кирпиченко Ю.Р., Пустынский И.Н. Датчики телевизионно-вычислительных систем: учеб. пособие для вузов. – Томск: В-Спектр, 2010. – 160 с.

3. Оценка качества цифровых изображений и видеоданных: учеб.-метод. пособие / Д.В. Матвеев, А.Г. Седов, В.В. Хрящев, А.Л. Приоров. – Ярославль: Яросл. гос. ун-т им. П.Г. Демидова, ЯрГУ, 2018. – 76 с.

4. Гонсалес Р.С. Цифровая обработка изображений / Р.С. Гонсалес, Р.Е. Вудс. – 3-е изд., исп. и доп. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.

5. Компьютерный портал «Colorimetр» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://photar.ru/datacolor-spyderx-review/> (дата обращения: 01.03.2022).

УДК 004.932.2

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

*А.Н. Шлыкович, студент*

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

Производится сравнение методов интерполяции изображения: ближайший сосед, билинейная, Ланцоша и бикубическая, используемых для повышения пространственного разрешения изображения. Критерием оценки повышения пространственного разрешения является эффективность.

**Ключевые слова:** интерполяция, изображение, ближайший сосед, бикубическая, билинейная, фильтр Ланцоша, MSE, PSNR, SSIM.

В данной работе был использован язык программирования Python с использованием таких библиотек, как OpenCV [1], NumPy [2]. Работа производилась в ПО PyCharm. В библиотеке OpenCV присутствуют необходимые алгоритмы обработки изображения, а библиотека NumPy обеспечивает работу с массивами изображения.

Рассмотрены методы интерполяции изображений, такие как ближайший сосед [3], билинейный [4], фильтр Ланцоша [5], бикубический [6].

Для оценки качества изображений после интерполяции использовались следующие метрики качества: *MSE*, *PSNR*, *SSIM* [7].

В качестве эталона было выбрано изображение размером 1280×720 элементов в формате .jpg. Для сравнения перед интерполяцией эталонное изображение было уменьшено в два раза до размеров 640×360, после чего размер изображения был увеличен до исходного рассматриваемыми методами. Ниже приведены фрагменты эталонного изображения и изображений, полученных методами интерполяции (рис. 1).

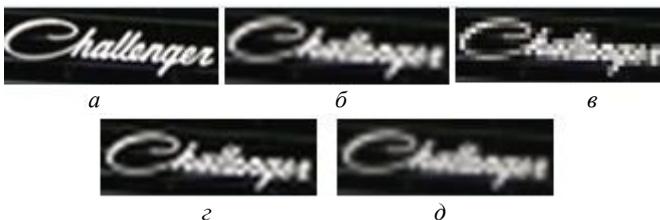


Рис. 1. Полученные изображения: *a* – эталон; *б* – бикубическое; *в* – ближайший сосед; *г* – Ланцоша; *д* – билинейное

Нахождение *MSE*, *PSNR* и *SSIM* производилось по формулам, приведенным ниже:

$$PSNR(x, y) = 10 \lg \frac{L^2}{MSE(x, y)}, \quad (1)$$

где *MSE* – среднеквадратичное отклонение.

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} |I(i, j) - K(i, j)|^2, \quad (2)$$

где *m*, *n* – размер изображений в пикселях, *I*, *K* – матрицы яркостей исходного и искаженного изображений соответственно.

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)}, \quad (3)$$

где  $\mu_y$  – среднее изображение *y*;  $\mu_x$  – среднее изображение *x*;  $\sigma_y^2$  – дисперсия *y*;  $\sigma_x^2$  – дисперсия изображения *x*;  $\sigma_{xy}$  – ковариация *y* и *x*;  $c_1$  – переменная, равная 6,5025;  $c_2$  – переменная, равная 58,5225. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты исследования методов при увеличении изображения в 2 раза**

Алгоритм	MSE	PSNR	SSIM
Ближайший сосед	170,38260	25,81657	0,85368
Билинейное	162,52734	26,02156	0,83784
Бикубическое	127,25004	27,08409	0,87366
Ланцоша	127,31277	27,08208	0,87356

Для более удобного и детального представления построим графики зависимостей *MSE*, *PSNR*, *SSIM* от метода интерполяции. На рисунках методы идут по порядку: 1 – ближайший сосед, 2 – билинейный, 3 – бикубический и 4 – Ланцоша. Чем меньше *MSE*, тем лучше, а *PSNR* и *SSIM* чем больше, тем лучше. Результат представлен на рис. 2, 3.

По полученным данным  $MSE$ ,  $PSNR$ ,  $SSIM$  из табл. 1 и рис. 2 видно, что лучше себя показал метод бикубической интерполяции изображения. Связано это с тем, что он берет 16 точек для интерполяции.

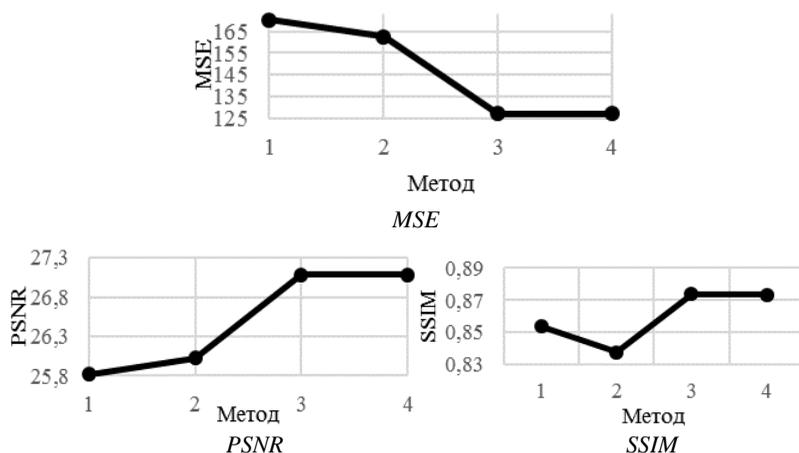


Рис. 2. Зависимость значений от метода

При использовании каждого метода присутствуют свои артефакты, такие как алиасинг, размытие, эффект Гиббса. При использовании метода ближайшего соседа изображение получается с артефактами. Алиасинг – это зубчатый эффект на линиях и переходах цвета, а при билинейной интерполяции появляется размытие, при методах Ланцоша и бикубической интерполяции проявляется эффект Гиббса, ореолы в местах яркостных переходов. Ниже представлены результаты работы при увеличении изображения в 4 раза и при комбинировании методов интерполяции (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты исследования методов для увеличения изображения в 4 раза и комбинировании методов интерпретации**

Алгоритм	MSE	PSNR	SSIM
Ближайший сосед	416,1311	21,9385	0,6371
Билинейное	375,9589	22,3795	0,6474
Бикубическое	336,7006	22,8585	0,6697
Ланцоша	334,3871	22,8884	0,6663
Ближайший сосед – билинейное	361,9999	22,5438	0,6628
Бикубическое – ближайший сосед	362,6723	22,5357	0,6512
Бикубическое – билинейное	352,5352	22,6589	0,6571
Ланцоша – билинейное	347,6949	22,7189	0,6570

При слияниях происходит сильное ухудшение качества изображения. Наилучшее комбинирование получилось при комбинации методов Ланцоша и билинейного алгоритма. По сравнению с начальным методом и комбинации хорошо себя показали комбинация ближайший сосед и билинейный алгоритм. Примеры получившегося изображения для наглядности представлены на рис. 3.

При комбинировании методов интерполяции изображений по значению  $MSE$ ,  $PSNR$  преобладают метод Ланцоша и бикубическая интерполяция.



Рис. 3. Полученное изображение: *a* – комбинирование ближайшего соседа и билинейного; *б* – билинейный

В данной работе было выяснено, что наилучшим методом для повышения пространственного разрешения изображения является бикубический алгоритм, а при комбинировании методов наилучшей комбинацией является метод Ланцоша и билинейной интерполяции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Суков А.В. Компьютерное зрение. Библиотека OpenCV и ее применение в прикладных задачах робототехники. – ДНР, Донец. нац. техн. ун-т, 2016.
2. Хабр, 2021 // Библиотека NumPy Python [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/352678/>, свободный (дата обращения: 6.03.2022).
3. Academic, 2021 // Метод интерполяции ближайший сосед [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1304779>
4. Сазонов В.В. Качественное увеличение деталей изображения / В.В. Сазонов, М.А. Щербаков // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. – 2013. – № 1.
5. Gamedev, 2021 // Метод интерполяции Ланцоша [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gamedev.ru/code/forum/?id=202955>, (дата обращения: 8.03.2022).
6. Robocraft, 2021 // Метод бикубической интерполяции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://robocraft.ru/computervision/3956>, (дата обращения: 9.03.2022).
7. Machinelearningmastery, 2021 // Классификация изображений с помощью SSIM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.machinelearningmastery.ru/image-classification-using-ssim-34e549ec6e12/>, (дата обращения: 8.03.2022).

## **ПОДСЕКЦИЯ 1.5**

### **ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОГО БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА**

*Председатель – **Рогожников Е.В.**, доцент каф. ТОР, к.т.н.*

УДК 621.376.32

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ LoRaWAN**

***М.С. Челпанов, студент***

*Научный руководитель **Е.В. Рогожников**, доцент каф. ТОР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. ТОР, [chelpmt@gmail.com](mailto:chelpmt@gmail.com)*

Рассматривается влияние различных типов помех на LoRaWAN-сигнал. Результатом работы стали зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум в случае влияния на сигнал аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ), а также зависимость вероятности битовой ошибки от отношения ширины спектра помехи к ширине спектра сигнала.

**Ключевые слова:** модуляция LoRa, LoRaWAN, аддитивный белый гауссовский шум, помеха.

LoRaWAN – технология низкоскоростной беспроводной системы передачи данных с низким энергопотреблением. Данная технология использует одноимённый вид модуляции LoRa, основанный на использовании ЛЧМ-колебаний и согласованной фильтрации [4]. LoRaWAN имеет высокую помехоустойчивость, однако данное утверждение применимо только для пассивных помех, в качестве которых, в частности, выступает АБГШ. Данная помеха обладает широким распределением в спектре, от чего обладает низким влиянием на сигнал в пределах спектра самого сигнала.

Данная работа призвана проверить помехоустойчивость LoRaWAN по отношению к помехам, распределённым в спектре, а также по отношению к помехам, сосредоточенным в пределах спектра LoRaWAN-сигнала.

В процессе моделирования в качестве сигнала-помехи, распределённой в спектре, используется АБГШ. В качестве сигнала-помехи,

сосредоточенной в спектре LoRaWAN-сигнала, используется OFDM-символ.

В результате моделирования получены зависимости величины вероятности битовой ошибки от отношения сигнал / шум, показанный на рис. 1.

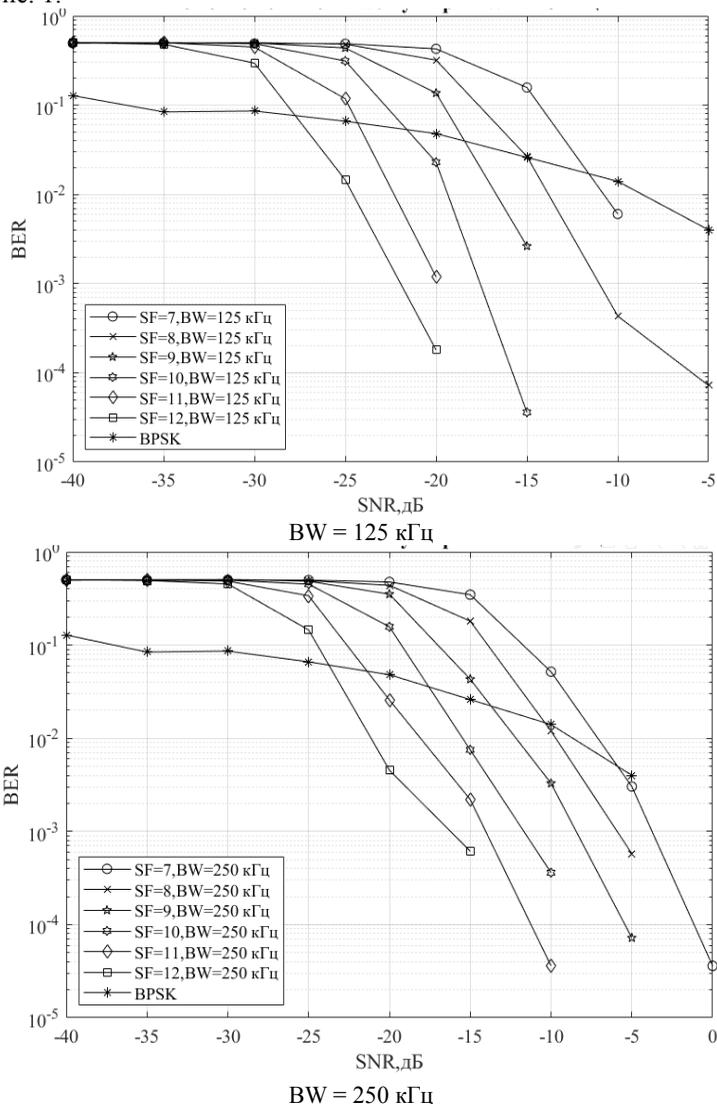


Рис. 1. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум

Как видно из рис. 2, вероятность битовой ошибки уменьшается при увеличении коэффициента расширения спектра (SF). Связано это с тем, что с увеличением SF увеличивается длительность каждого символа LoRa. Из-за увеличения длительности символа на приемной стороне происходит накопление конкретной спектральной составляющей в результирующем произведении принятого и опорного сигналов. Как следствие, после преобразования Фурье амплитуда максимумов в спектре увеличивается.

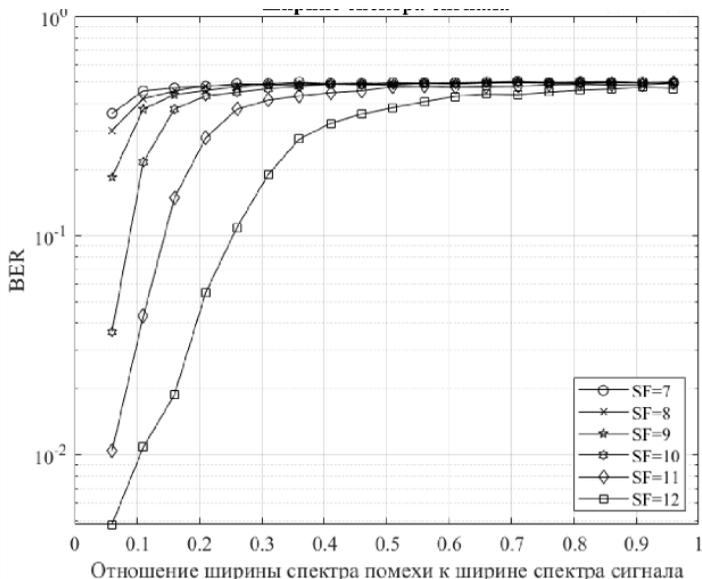


Рис. 2. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения ширины спектра помехи к ширине спектра сигнала

Как видно из рис. 2, вероятность ошибки LoRaWAN увеличивается лавинообразно, и даже при низкой ширине помехи вероятность ошибки сильно увеличивается.

Связано это с тем, что спектральные составляющие, на которых находится сигнал помехи, имеют высокую мощность и как следствие большую корреляцию по сравнению с остальными спектральными составляющими. При увеличении ширины спектра помехи таких спектральных составляющих становится больше и величина вероятности битовой ошибки возрастает.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Semtech, AN1200.22. LoRa modulation basics. Application Note, 2015.

2. Обзор технологии LORA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://itechinfo.ru/content/обзор-технологии-lora>, свободный (дата обращения: 16.02.2021).

3. Тисленко В.И. Статистические методы обработки сигналов в радиотехнических системах. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 245 с.

4. Челпанов М.С. Метод формирования радиосигнала в соответствии со стандартом модуляции LORA // Матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 19–21 мая 2021 г.: в 3 ч. – Томск: В-Спектр, 2021. – Ч. 1. – 262 с.

УДК 004.94

## **РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕНЕРАТОРА ПСЕВДОСЛУЧАЙНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА ПЛИС**

*К.В. Диноченко, студент каф. ТОР*

*Научный руководитель Е.В. Рогожников, доцент каф. ТОР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, k.dinochenko@yandex.ru*

Описывается генератор псевдослучайных последовательностей (ПСП). Реализация генератора ПСП на регистре сдвига с линейной обратной связью (РСЛОС) на ПЛИС компании Altera с использованием языка программирования Verilog.

**Ключевые слова:** генератор ПСП, ПСП, регистр сдвига с линейной обратной связью, РСЛОС, ПЛИС, Verilog, Altera, FPGA, MatLab, Cyclone V.

Генератор псевдослучайной последовательности (ПСП) – механизм, создающий ряд чисел, значения которого имеют малую зависимость друг от друга и подчиняются определенному распределению (чаще всего равномерному).

Реализация генератора может быть осуществлена с помощью РСЛОС.

Регистр сдвига с линейной обратной связью – сдвиговый регистр, входной бит которого представляет собой результат функции от определенных битов регистра до сдвига.

В состав РСЛОС входят две основные части: сдвиговый регистр (рис. 1) и функция обратной связи.

Сдвиговый регистр является последовательностью битовых ячеек, количество которых определяется длиной регистра.

Функция обратной связи осуществляет логическую операцию «XOR» (исключающее ИЛИ).

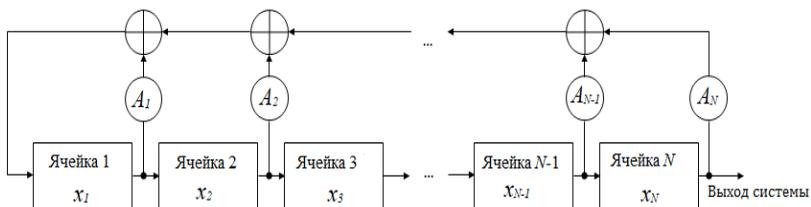


Рис. 1. Сдвиговый регистр с линейной обратной связью

РСЛОС описывается характеристическим многочленом вида

$$F(x) = A_N x^N + A_{N-1} x^{N-1} + \dots + A_2 x^2 + A_1 x^1 + 1.$$

Число битовых ячеек соответствует степени многочлена. Если на вход функции обратной связи подается выход разряда, то его коэффициент  $A_i$  равен единице. Периодичность генератора зависит от места и количества элементов функции обратной связи. Для получения максимального периода характеристический член должен быть примитивным. Для этого необходимо выполнение следующих условий:

- четное число операндов;
- номера отводов, взятые все вместе, взаимно просты.

Расчет примитивного полинома достаточно сложен, поэтому можно воспользоваться таблицами с готовыми полиномами для максимального периода последовательности.

Различные модификации РСЛОС используются в криптографии, тестировании цифровых устройств, скремблировании и т.д.

**Целью** данной работы является разработка генератора ПСП для генерации случайного битового потока, используемого в качестве информационных данных для тестирования системы с OFDM-модуляцией.

Для реализации генератора ПСП на ПЛИС с помощью РСЛОС использовались готовые таблицы примитивных многочленов [5]. Выбран РСЛОС длиной 27, задающийся следующим многочленом:

$$F(x) = x^{27} + x^5 + x^2 + x.$$

Период данного генератора составит

$$T = 2^N - 1 = 2^{27} - 1 = 134217727.$$

Основным критерием выбора был период генератора более 100 млн бит. Этого периода более чем достаточно для проверки реализуемого передатчика OFDM.

Реализация происходила в программном обеспечении Quartus Prime с использованием языка программирования Verilog и ПЛИС Altera семейства Cyclone V от компании Terasic.

На ПЛИС создание генератора ПСП выполняется по следующему алгоритму:

1. Задается 27-разрядный регистр, который будет выступать в роли сдвигового регистра. Каждый разряд выступает в качестве битовой ячейки. Этому регистру задается ненулевое состояние, иначе функция обратной связи будет принимать только нулевое значение, а значит, значение генератора будет всегда нулевое (рис. 2).

```
reg [26:0]shift_reg;  
initial shift_reg <= 27'b11111111111111111111111111111111;
```

Рис. 2. Инициализация сдвигового регистра

2. Затем происходит вычисление значения обратной связи. С помощью операнда XOR (исключающее ИЛИ), происходит суммирование 0, 1, 4 и 26-го разряда сдвигового регистра (рис. 3).

```
wire next_bit;  
assign next_bit=shift_reg[26]^shift_reg[ 4]^shift_reg[ 1]^shift_reg[ 0];
```

Рис. 3. Функция обратной связи

3. Происходит сдвиг регистра: 26-му разряду присваивается значение 25; 25 – значение 24 и т.д. (рис. 4).

```
for(i=26;i>=1;i=i-1)  
begin  
  shift_reg[i]<=shift_reg[i-1];  
end
```

Рис. 4. Сдвиг регистра

4. После сдвига регистра нулевому регистру присваивается значение обратной связи, вычисленное на шаге 3 (рис. 5).

```
shift_reg[0]<=next_bit;
```

Рис. 5. Присвоение нулевой ячейке результата обратной связи

Для проверки работоспособности генератора используем MatLab. Снимем данные с регистра и построим график распределения в MatLab (рис. 6).

**Заключение.** Как видно из рис. 6, график распределения очень близок к равномерному распределению чисел. Период последовательности соответствует рассчитанному значению. Разработанный генератор ПСП позволил реализовать регулируемый псевдослучайный поток данных на передатчике для тестирования системы с OFDM-модуляцией, сформировал поток, наиболее приближенный к реальной информации, а также обеспечил меньший уровень пик-фактора на выходе передатчика.

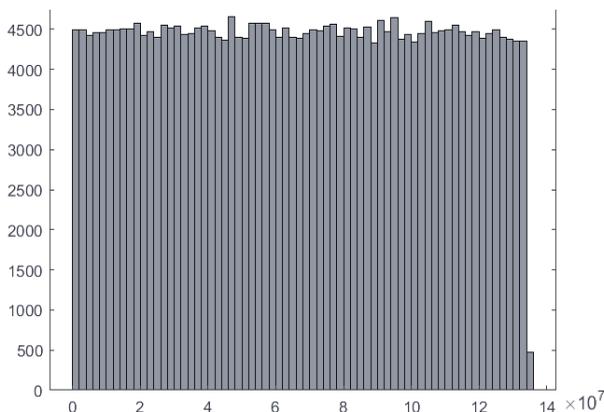


Рис. 6. График распределения сгенерированных чисел

### ЛИТЕРАТУРА

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – Вильямс, 2007. – 1104 с.
2. L'Ecuyer, Pierre. Random Number Generation // Springer Handbooks of Computational Statistics. – 2007. – P. 93–137.
3. LFSR: генерация псевдослучайных чисел на регистре сдвига [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://microsin.net/programming/avr/lfsr-pseudo-random-number-generator.html>, свободный (дата обращения: 04.03.2022).
4. АСУТП и интеллектуальная начинка приборов: формирователь псевдослучайной последовательности на ПЛИС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://газп2.blogspot.com/2015/12/blog-post.html>, свободный (дата обращения: 04.03.2022).
5. Efficient Shift Registers, LFSR Counters, and Long Pseudo-Random Sequence Generators [Электронный курс]. – Режим доступа: [https://www.xilinx.com/support/documentation/application\\_notes/xapp052.pdf](https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp052.pdf), свободный (дата обращения: 04.03.2022).

УДК 004.056

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК SIEM-СИСТЕМ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ НА РОССИЙСКОМ РЫНКЕ

*В.Р. Мавлютова, студентка*

*Научный руководитель А.И. Кураленко, доцент, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. РСС, mavlutova.lera@gmail.com*

Представлен сравнительный анализ основных технических характеристик SIEM-систем.

**Ключевые слова:** система SIEM, система управления событиями, протоколы передачи, форматы событий, правила нормализации, правила корреляции, логирование.

SIEM-система – система сбора и корреляции событий. Рынок SIEM-систем быстро развивается, а количество представляемых решений стабильно расширяется [1]. На российском рынке широкое распространение получили такие системы, как MaxPatrol SIEM от компании Positive Technologies, RUSiem от компании RUSiem, а также HP ArcSight от Hewlett Packard Enterprise.

Также совсем недавно на российском рынке была представлена SIEM-система от лаборатории Касперского – KUMA [2, 3].

Действуя в соответствии со стратегией импортозамещения, в соответствии со списком сертифицированного ФСТЭК-ом программного обеспечения, для дальнейшего сравнения были выбраны следующие системы: MaxPatrol SIEM, RUSiem, KUMA (в этом году была подана заявка на получение сертификата).

Далее представлена таблица сравнения вышеупомянутых SIEM-систем по их техническим характеристикам. Информация для дальнейшего сравнения была получена от вендоров систем [4].

#### Сравнение технических характеристик SIEM-систем

Критерии оценки / Вендор	MaxPatrol SIEM	RUSiem	KUMA (Kaspersky)
1	2	3	4
Соответствие импортозамещению			
Языки интерфейса	Русский, английский	Русский, английский	Русский, английский
Сертификаты ФСТЭК России	№ 3734 от 12.04.2017 (НДВ4, ТУ)	Сертификат соответствия ФСТЭК России № 4402, выданный 12 мая 2021 г. (4 ОУД, ТУ)	В процессе получения
Управление инцидентами, уязвимостями, активами			
Карточка инцидента (количество полей)	19 полей	372 поля, настраиваемые пользователем	18 полей + необходимые для НКЦКИ
Настройка собственной модели определения критичности уязвимости	CVSS уязвимости плюс критичность актива в формате CVSS 2.0	Да	CVSS уязвимости
Риск-корреляция, учет риск-корреляции в правилах	Риск-корреляция на уровне корреляционной логики, параметров критичности активов, конфигурационных свойств самого актива, а также его положения в инфраструктуре	Через симптомы, определяющие вес события. Через правила корреляции. Через AI с уточнением в правилах	Риск-корреляция на уровне корреляционной логики, параметров критичности активов, конфигурационных свойств самого актива, а также его положения в инфраструктуре

Продолжение таблицы

1	2	3	4
Определение критичности актива	CVSS, если есть интеграции со сканерами	Нет	Да, на основе групп
Предустановленные правила корреляции	200+. Добавление наборов правил корреляции Expert pack >24	350+	100+
Предустановленные графические панели (Dashboards)	32	10	2
Предустановленные отчеты	40<	50<	2
Системная архитектура			
Операционная система в основе решения	Windows, Debian	Ubuntu x64	Oracle Linux, CentOS, Astra Linux
СУБД	Elasticsearch	Elasticsearch, RuSIEM DB, postgresql, ClickHouse, neo4j	ClickHouse
Количество обрабатываемых событий в секунду	15k EPS 30k EPS	До 90k EPS событиями 300B на одну ноду, без лимита в распределенной установке	До 300к EPS и более
Управление событиями и данными			
Агрегация событий	+	-	+
Нормализация событий	+	+	+
Метод сбора событий с источников	Как агентский, так и пассивный	Как агентский, так и пассивный	Как агентский, так и пассивный
Ключевые поддерживаемые форматы сбора событий	Syslog, Log File Protocol, SNMP, ODBC, WinRPC, OPSEC, FTP, smb, vSphere API, WMI	Syslog, WMI, FTP, checkpoint lea, cisco sdec, file, ms sql, mysql, oracle, lc, windows event log, hashlog	tcp, udp, netflow, nats, kafka, http, sql, file, ftp, nfs, wmi, wec, snmp
Сбор данных о сетевом трафике	Отдельный модуль, использующий SPAN или NetFlow	SPAN, RuSIEM Network Sensor	Сбор от сетевых устройств Netflow / SPAN
Подключение источников событий			
Количество поддерживаемых источников событий	200+	100+ уникальных, 500+ разновидностей и версий	100+

## Окончание таблицы

1	2	3	4
Возможность подключения нестандартных источников	Можно подключить источники за счет вендора (вендор самостоятельно пишет парсеры в рамках технической поддержки)	Возможно автопарсерами или написание парсера. Возможна разработка транспорта	Можно подключить источники за счет вендора (вендор самостоятельно пишет парсеры в рамках технической поддержки)
Автоматическое обнаружение источников событий	+	+	Нет, в 2022 г. будет

Одним из основных критериев выбора является количество поддерживаемых источников. Этот параметр показывает, сможет ли SIEM обработать события от того или иного источника или нет. В случае если система не распознает логи от источника, необходимо обращение к вендору на пополнение базы знаний SIEM, т.е. на разработку новых правил нормализации для нового источника.

Опираясь на такие ключевые критерии, как политика лицензирования, количество поддерживаемых источников и правил из коробки, а также вид базы данных, решение MaxPatrol SIEM представляется наиболее оптимальным при выборе.

В силу новизны таких решений, как RuSIEM и KUMA, количество поддерживаемых ими источников существенно меньше, но тем не менее данные решения применяются в маломасштабных компаниях, где нет огромного количества различного софта. Стоит отметить, что по быстрдействию данные системы даже превосходят MaxPatrol SIEM.

Информация, представленная в данной статье, может быть использована в процессе подготовки инфраструктуры компании к внедрению, а также при выборе программного обеспечения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. SIEM-системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://searchinform.ru/products/siem/sravnienie-siem-sistem/> (дата обращения: 15.12.2021).
2. SIEM-системы. Обзор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.anti-malware.ru/analytics/Technology\\_Analysis/Popular-SIEM-Starters-Use-Cases](https://www.anti-malware.ru/analytics/Technology_Analysis/Popular-SIEM-Starters-Use-Cases) (дата обращения: 15.12.2021).
3. SIEM-системы: важное звено в архитектуре защиты данных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://securenews.ru/siem/> (дата обращения: 01.02.2022).
4. Сравнение SIEM-систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.anti-malware.ru/compare/SIEM-systems> (дата обращения: 02.02.2022).
5. Краткое сравнение существующих решений класса SIEM [Электронный ресурс]. – <https://pirit.biz/informaciya/articles/siem-sistemy.-kratkij-obzor-sushhestvuyushhih-reshenij/> (дата обращения: 04.02.2022).

## **ПОДСЕКЦИЯ 1.6**

### **РОБОТОТЕХНИКА**

*Председатель – Коцубинский В.П., доцент каф. КСУП, к.т.н.*

УДК 004.896

#### **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРАТЕГИЙ ПРОГРАММ ДЛЯ РОБОТА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ЛИГИ RCAP COSPACE RESCUE**

*Д.А. Анисимов, студент каф. ЭП*

*Научный руководитель Е.С. Шандаров, зав. ЛРИИ*

*Проект ГПО ЭП-0703. Видео по запросу*

*г. Томск, ТУСУР, evgenyshandarov@gmail.com*

Рассматривается задача выбора оптимальной стратегии для программы робота в соревнованиях по робототехнике лиги RCAP CoSpace Rescue, приведены результаты испытаний разработанного программного обеспечения.

**Ключевые слова:** робототехника, RoboCup, CoSpace, стратегия, симулятор робота.

Международный чемпионат по робототехнике RoboCup основан в 1993 г. и призван интенсифицировать процесс обмена знаниями в областях робототехники и искусственного интеллекта [1–3] путем участия команд исследователей и разработчиков в соревнованиях. Турнир проводится в разных лигах, кроме этого, существует разделение на две большие группы: «взрослые» (команды университетов, НИИ и компаний) и «юниоры» (школьники и студенты младших курсов). Наиболее массовыми являются соревнования команд юниоров, где участники конкурируют друг с другом в лигах по футболу роботов, роботов-спасателей и шоу с роботами.

**Лига RCAP CoSpace Rescue.** В лиге (входит в программу мероприятий чемпионата RoboCup Азиатско-Тихоокеанского региона) участникам соревнований необходимо разработать программу, реализующую стратегию для робота-спасателя, функционирующего в среде симуляции. Робот движется по карте местности, на которой условными знаками отмечены препятствия, объекты для сбора («жертвы»), зоны выгрузки объектов. Задача робота – сбор объектов и доставка их

в зоны выгрузки, за каждый из которых команде начисляются очки. Количество очков зависит от типа объекта. Победителем становится та команда, которая наберет за отведенное время наибольшее количество очков. Конфигурация карты местности заранее известна участникам соревнований, объекты для сбора появляются на карте в разных местах случайным образом. Робот может собрать не более 6 объектов. При выгрузке 3 объектов разного типа появляется «суперобъект+», если робот собирает 3 объекта 1-го типа появляется «суперобъект», координаты «суперобъекта» и «суперобъекта+» сообщаются роботу.

Всего возможно 4 типа различных объектов, их примеры представлены на рис. 1 [5].

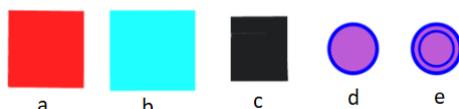


Рис. 1. Типы объектов

За сбор каждого объекта робот получает определенное количество очков, за сбор «а» (красного объекта) 10 очков, за сбор «b» (голубого объекта) 15 очков и за сбор «с» (черного объекта) робот получает 20 очков. Собирая «d» («суперобъект»), робот получит 45 очков, при сборе «е» («суперобъект+») начисляется 90 очков. Если сбор произошел на синей зоне карты, то количество очков, полученное при сборе «а», «b», «с», удваивается.

**Стратегии ведения игры.** Поскольку победа зависит от количества набранных роботом очков, целесообразно не просто собирать объекты, а продумать стратегию, направленную на достижение максимального результата.

Для исследования были выбраны две стратегии ведения игры. Первая стратегия заключается в создании оптимального маршрута для робота на карте местности. Робот будет двигаться по маршруту, собирая объекты на пути, и, при возможности, производить выгрузку в зоны выгрузки, находящиеся на пути робота. При появлении суперобъекта робот будет отправлен к нему для сбора. Пример маршрута представлен на рис. 2.

Второй стратегией ведения игры был выбран алгоритм движения робота по зонам. До начала игры проводится небольшое исследование для обнаружения зон, в которых чаще всего появляются объекты. Затем разрабатывается алгоритм поиска кратчайшего пути между этими зонами. Пример таких зон представлен на рис. 3.

Во время работы робот будет по очереди обходить обозначенные зоны, собирая в них объекты, после обхода всех 3 зон робот отправля-

ется в зону выгрузки для последующей выгрузки объектов. Для более эффективной работы выбирается несколько зон для каждого типа объектов, так как при многократном обходе одних и тех же зон объекты в них перестают появляться.

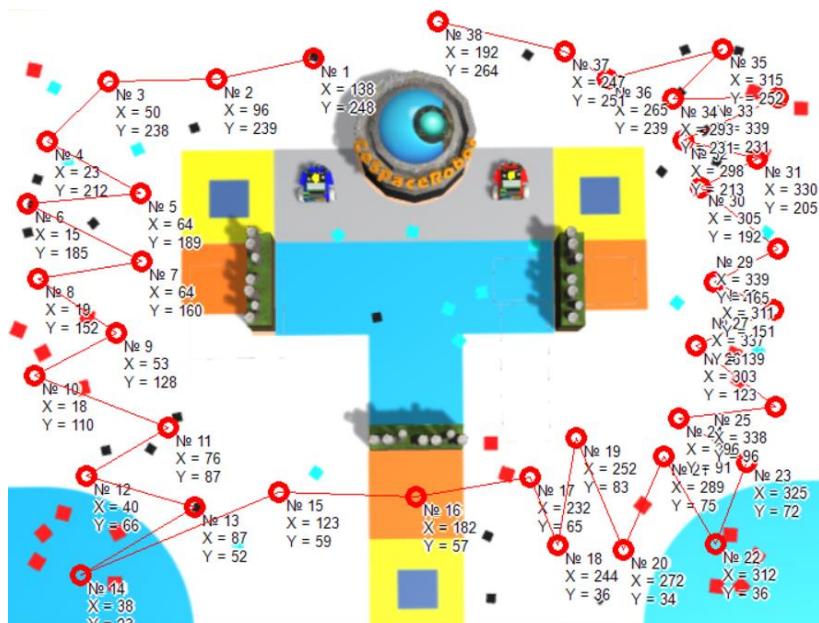


Рис. 2. Пример маршрута

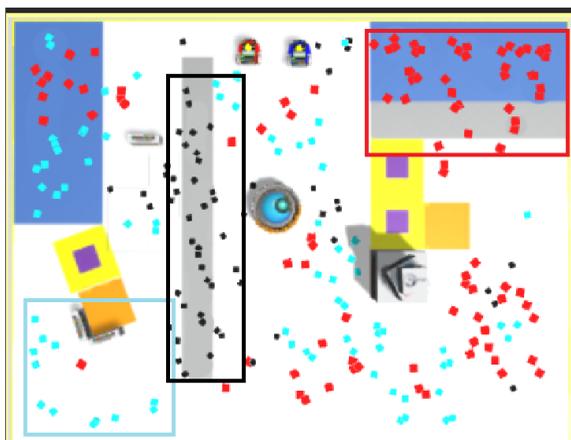


Рис. 3. Пример зон распределения объектов

**Испытания.** Испытание стратегий проводилось на 2 разных картах, результаты представлены в таблице, где указано количество очков, полученных за 6 мин на каждой карте. Для более точной оценки при тестировании каждой стратегии были использованы два алгоритмы для сбора-выгрузки объектов. Первый алгоритм «полный сбор»: робот выгружает объекты только после сбора максимального количества объектов (6), также учитывается, что робот будет собирать по два объекта разных типов. Второй алгоритм «неполный сбор»: робот экономит время на сбор объектов и собирает только три объекта для выгрузки.

**Результаты испытаний**

Карта	Координаты (полный сбор)	Координаты (неполный сбор )	Зоны (полный сбор)	Зоны (неполный сбор)
1	2200	1980	2000	2160
2	1890	1820	2020	2360

**Оценка преимуществ и недостатков выбранных стратегий.** В результате тестирования первой стратегии установлено, что стратегия хорошо себя показала на больших и запутанных картах с большим количеством препятствий из-за своей гибкости в выборе маршрута для движения, однако у данной стратегии есть один большой минус: так как движение происходит по одному и тому же маршруту, в какой-то момент объекты на пути робота могут закончиться и тогда робот будет терять время на поиски объектов. Алгоритм полного сбора при выборе данной стратегии является самым оптимальным, так как при полном сборе на обход маршрута будет тратиться примерно такое же время, как и при использовании алгоритма неполного сбора, однако при этом робот будет собирать больше объектов, следовательно, получать больше очков. В результате получается более эффективный сбор за одинаковое время.

При тестировании второй стратегии был выявлен недостаток: данная стратегия плохо подходит для карт с большим количеством препятствий, это сильно затрудняет движение робота между зонами вследствие чего теряется много времени на поиск пути к зоне, однако на более открытых картах данная стратегия показывает отличные результаты. При использовании данной стратегии более оптимальным алгоритмом для сбора будет являться неполный сбор, это связано с тем, что при обходе зон выгрузка происходит только при обходе каждой зоны, следовательно, нет смысла терять время на поиск второго объекта в одной и той же зоне, если быстрее собрать по одному объекту и получить суперобъект.

**Закключение.** В результате проведенного исследования было выяснено, что каждая стратегия имеет преимущества и недостатки на определенных типах карты местности. Для больших и запутанных карт лучшие результаты дает стратегия, основанная на создании маршрута для робота, использующая полный сбор для экономии времени. Для карт с малым количеством препятствий лучше использовать стратегию движения робота по зонам, использующую неполный сбор, так как на таких картах движение по зонам будет более эффективным как по времени, так и по сбору объектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ронжин А.Л. Международные соревнования роботов по футболу Robocup и перспективы участия в них российских команд / А.Л. Ронжин, Л.А. Станкевич, Е.С. Шандаров // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 2(7). – С. 24–29.
2. Gomilko S. Robot soccer team for robocup humanoid kidsize league / S. Gomilko, D. Zhulaeva, D. Rimer et al. // Lecture Notes in Computer Science. – 2016. – Vol. 9812. – P. 181–188. DOI: 10.1007/978-3-319-43955-6\_22.
3. Команда роботов-футболистов лиги RoboCup Humanoid KidSize / С.И. Гомилко, Д.В. Жулаева, Р.В. Мещеряков и др. // Робототехника и техническая кибернетика. – 2015. – № 3(8). – С. 11–15.
4. Официальный сайт RoboCup Asia Pacific [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cospacerobot.org/about/cospace-robot-simulator-programming>. (дата обращения: 09.03.2022).
5. Регламент соревнований «RoboCupJunior CoSpace Rescue» [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.robocuprussiaopen.ru/data/2020/CoSpace/Virtual\\_RCAP\\_CoSpace\\_Rescue\\_Rules\\_2020\\_U19\\_V2.pdf](http://www.robocuprussiaopen.ru/data/2020/CoSpace/Virtual_RCAP_CoSpace_Rescue_Rules_2020_U19_V2.pdf) (дата обращения: 09.03.2022).

УДК 62-783.1

### **СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ОХРАННОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ И УМНОГО ДОМА ДЛЯ ЛАБОРАТОРИИ ТУСУРА**

*Е.А. Архипова, магистрант*

*Научный руководитель М.Е. Антипин, доцент, к.ф.-м.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. УИ, [katy-1997@list.ru](mailto:katy-1997@list.ru)*

Рассмотрены два вида реализации системы безопасности, их особенности, задачи и выбор наиболее подходящего варианта для использования в лаборатории.

**Ключевые слова:** радиоустройство, хаб, контроллер, умный дом, канал Ethernet, облачная платформа Livicom, лаборатория.

Для реализации безопасности и комфорта в лаборатории ТУСУРа было рассмотрено два варианта систем: охранная сигнализация и умный дом.

Система охранной сигнализации – система, включающая в себя необходимый минимум оборудования и решающая первостепенные задачи для защиты помещения: от проникновения, взлома, порчи оборудования и кражи.

Система умного дома – комплекс программно-аппаратных компонентов, предоставляющий пользователю возможность дистанционного управления и автоматизации системами и оборудованием здания или квартиры. Она решает задачи не только охраны, но и обеспечения удобства мониторинга и управления системами отопления, освещения, энергопотребления [1].

Для выбора подходящего варианта необходимо определить особенности вышеприведенных систем. Для этого были рассмотрены радиоустройства Livi НПП «Стелс», так как было решено применять их оборудование. Так как основную роль в комплексе играет хаб или контроллер, была проведена их сравнительная характеристика (таблица).

**Сравнительные характеристики хаба умного дома и контроллера**

	Хаб	Контроллер
Количество подключаемых устройств	Подключение до 256 радиоустройств Livi. Исключение: – двухканальные радиоустройства Livi; – исполнительные радиоустройства Livi (не более 64); – исполнительные двухканальные радиоустройства Livi (не более 32)	8 шлейфов, расширение с помощью модулей, сетевых панелей и трансиверов
Источники питания	Питание – от сети переменного тока напряжением около 230 В	Два резервных источника питания: 1) аккумуляторная батарея (приобретается отдельно); 2) внешний источник резервного питания (приобретается отдельно).
	Резервное питание – аккумуляторная батарея (входит в комплект)	
Способы передачи данных	– Беспроводная сеть – Wi-Fi или мобильный интернет (основной способ); – проводное подключение (канал Ethernet).  Возможно подключение 2 каналов одновременно	– Проводная сеть Ethernet (основной способ); – Беспроводная сеть Wi-Fi.  В некоторых контроллерах предусмотрен мобильный интернет

Сбои и прерывания связи в сети	Оповещение мобильным приложением о потере связи: – между хабом и облачной платформой Livicom; – между хабом и сервером STEMAX, если подключена услуга профессиональной охраны; – если извлечь или повредить Ethernet-кабель. Использование резервной сети	Использование резервной сети GSM
Управление контроллером / хабом	– Мобильное приложение Livicom; – голосовое меню; – SMS-сообщения	– Мобильное приложение; не везде предусмотрено: – голосовое меню; – SMS-сообщения. Для управления объектами охраны могут использоваться считыватели электронных ключей, пульт управления, сетевые/кодвые панели
Оповещения пользователей	– Мобильное приложение; – SMS и голосовой звонок	– Мобильное приложение; – SMS и голосовой звонок (не везде предусмотрено)
Совместимость с радиоустройствами Livi	Полная совместимость	Есть ограничения [2]

Исходя из требований для проектирования системы и сравнения возможностей систем умного дома и охранной сигнализации, предполагается целесообразным реализация системы Умного дома для лаборатории робототехнических манипуляторов, поскольку она по сравнению с другой имеет некоторые преимущества:

- совместимость со всеми устройствами Livi;
- несколько каналов передачи информации, возможности масштабирования;
- разные способы оповещения пользователей;
- использование различных сценариев действий устройств;
- широкие возможности мобильного приложения;
- возможность создания Умной лаборатории за счет усложнения системы путем добавления устройств контроля и мониторинга.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Охранно-пожарная сигнализация // МВД России. Энциклопедия. – М.: ОЛМА-ПРЕСС, 2002.
2. Stels Smart telematic systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nppstels.ru/> (дата обращения: 25.02.2022).

## **ПОДСЕКЦИЯ 1.7**

### **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

*Председатель – Шурыгин Ю.А., директор департамента  
управления и стратегического развития ТУСУРа,  
зав. каф. КСУП, проф., д.т.н.;*  
*зам. председателя – Черкашин М.В., декан ФВС,  
доцент каф. КСУП, к.т.н.*

УДК 621.372.5

#### **МОДИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ СВЧ-КОМПОНЕНТОВ**

*Е.В. Кабанова, А.А. Березин, А.Р. Дягай, студенты каф. КСУП*  
*Научные руководители: А.Е. Горяинов, доцент каф. КСУП, к.т.н.;*  
*А.А. Калентьев, доцент каф. КСУП, к.т.н.*  
*г. Томск, ТУСУР, kabanova.ekaterina.2000@gmail.com*

Проведено описание программы для автоматизированного построения моделей пассивных СВЧ-компонентов. Проведено сравнение средств для создания десктоп-приложений Windows Forms и WPF. Предоставлены аргументы в пользу использования платформы WPF.

**Ключевые слова:** СВЧ, пассивный компонент, модель, автоматизация.

Программа Passive Components Modeling (PCM) предназначена для автоматизированного построения моделей пассивных СВЧ-компонентов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности) в виде эквивалентных схем по измеренным S-параметрам. Она является самостоятельной частью программы анализа и обработки СВЧ-измерений DataViewer [1].

На данный момент программа PCM реализована на платформе Windows Forms.

Преимущества Windows Forms [4]:

- технология Windows Forms существует с 2008 г., поэтому хорошо испытаны и протестирована;
- большое множество готовых элементов управления;
- Visual Studio хорошо приспособлен к WinForms.

Диаграмма классов программы РСМ представлена на рис. 1.

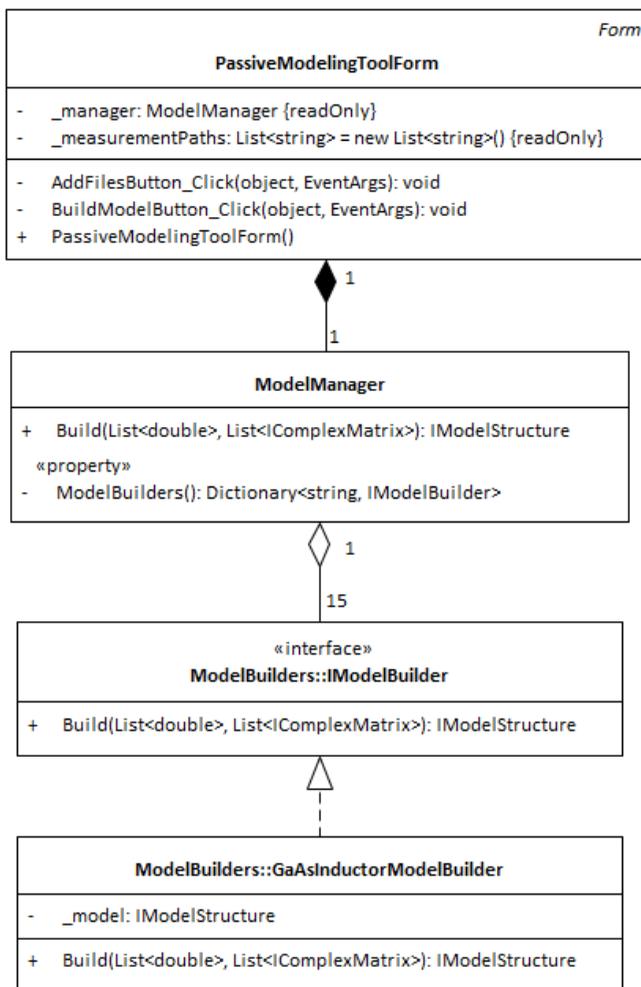


Рис. 1. Диаграмма классов программы РСМ

Несмотря на то, что технология Windows Forms имеет все необходимые инструменты для создания десктоп-приложений любой сложности, с ростом кодовой базы WinForms-приложения становится сложно модифицировать и тестировать. Поддержку приложения усложняет большое количество кода, привязанного к интерфейсу.

Преимущества WPF:

- WPF-приложения обладают большей производительностью за счет технологии DirectX [2].
- Интерфейс приложения не зависит от разрешения экрана [2].
- Декларативный пользовательский интерфейс позволяет отделить графический интерфейс от логики приложений [2].
- Инструмент привязки данных располагает к использованию паттерна MVVM. MVVM (Model – View – ViewModel) – один из паттернов семейства MV\*, позволяющий отделить логику приложения от представления [3].
- Стили позволяют стандартизировать форматирование и многократно использовать его по всему приложению. Шаблоны дают возможность изменить способ отображения элементов, даже таких основополагающих, как кнопки [4].

В связи со всеми перечисленными преимуществами платформы WPF была поставлена задача по переносу программы PCM на платформу WPF с применением паттерна MVVM. На рис. 2 представлена новая архитектура программы.

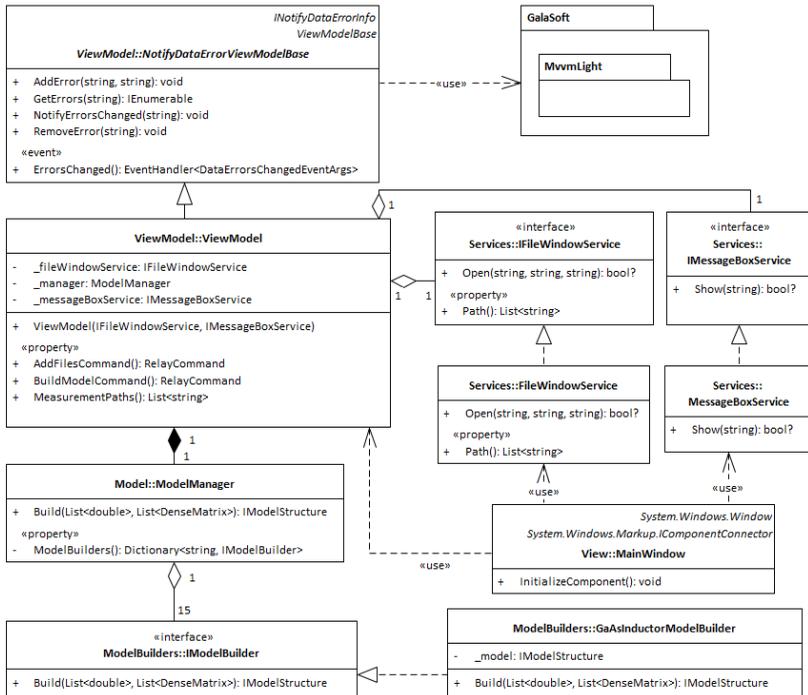


Рис. 2. Новая архитектура приложения PCM

Согласно паттерну MVVM, вся архитектура приложения делится на три части: Model (бизнес-логика), View (интерфейс) и ViewModel (связующее между Model и View). Для создания класса ViewModel используется библиотека MVVMLight [5].

Перенос РСМ на платформу WPF с применением паттерна MVVM позволит создать более гибкую архитектуру программы и упростить ее дальнейшую разработку и тестирование.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кабанова Е.В., Березин А.А., Дягай А.Р. Рефакторинг модуля для автоматизированного построения моделей пассивных СВЧ-компонентов // Матер. X регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», 15 октября – 30 ноября 2021 г. – С. 252–255.

2. Преимущества WPF [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://professorweb.ru/my/WPF/base\\_WPF/level1/1\\_3.php](https://professorweb.ru/my/WPF/base_WPF/level1/1_3.php) (дата обращения: 04.03.2022).

3. Паттерн MVVM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://metanit.com/sharp/wpf/22.1.php> (дата обращения: 04.03.2022).

4. WPF vs. WinForms [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://wpftutorial.com/ru/2/%D0%BD%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%BEwpf/wpf- vs- winforms/> (дата обращения: 04.03.2022).

5. MVVMLight [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nuget.org/packages/MvvmLightLibs/> (дата обращения: 09.03.2022).

УДК 621.372

#### **РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА LINES MODELLING TOOLBOX ПУТЕМ ДОПОЛНЕНИЯ СПИСКА МОДЕЛИРУЕМЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СТРУКТУР**

***В.А. Бондарь, К.Б.-Б. Дагба, А.И. Степанюга, студенты***

*Научный руководитель А.Н. Сычев, проф., д.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП*

Ведется разработка программного комплекса для моделирования распределенных компонентов новых СВЧ-устройств под названием Lines Modelling Toolbox. Реализованы новые квазистатические модели линий передачи. Осуществлено расширение списка проектируемых структур.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, распределенные компоненты, программный продукт Lines Modelling Toolbox, высокочастотные компоненты, линии передачи.

Программный продукт Lines Modelling Toolbox (LMT) [1] для настольных компьютерных систем представляет собой инструмент моделирования распределенных высокочастотных компонентов для новых радиоэлектронных систем. Данный проект получил финансовую поддержку Фонда содействия инновациям и был разработан в рамках программы УМНИК-2020.

Процесс моделирования, лежащий в основе программы, осуществляется посредством применения конформных отображений, которое, свою очередь, базируется на интеграле Кристоффеля–Шварца [2]. Данная функциональность реализуется на языке программирования Fortran ввиду использования программного пакета SCPack [1], также разработанного на языке Fortran Трефезеном в 1980 г. Основная программа, включающая в себя графический интерфейс пользователя (GUI), реализована на платформе Windows Presentation Foundation (WPF) на языке программирования C# в среде Microsoft .Net [4]. Применение .Net Framework [4] версии 4.0 позволяет разрабатывать приложение для различных версий Windows, в том числе Windows XP. Для интеграции расчетной функциональности, представленной в виде совокупности DLL-файлов в основную программу, применяется технология маршалинга взаимодействия [5]. На предварительном этапе разработки моделируемые программным продуктом структуры были представлены набором, приведенным в таблице.

**Набор моделируемых структур предварительного этапа разработки**

Тип	Название
Одиночные	Копланарная
	Копланарная с заземлением
	Микрополосковая
	Коаксиальная
Связанные	Структура с вертикальной вставкой
	Микрополосковая
Многопроводные	Микрополосковая

В рамках описываемой работы были реализованы новые квазистатические модели линий передачи и внедрены в программный продукт в качестве расчетных модулей. Новые моделируемые структуры представлены следующим набором:

1. Одиночная структура круглого проводника над землей [2]. Одиночный круглый провод в своей первоначальной форме применяется для передачи СВЧ-энергии не слишком широко ввиду высоких потерь на излучение. Это происходит из-за отсутствия экранировки в конструкции линии [1]. Однако при введении плоского диэлектрика

между проводником и пластиной данное ограничение значительно ослабляется, придавая эффект частичной концентрации электрического поля, уменьшая потери на излучение.

2. Связанная структура круглых проводников в прямоугольном экране [3]. Данная структура также известна как направленный ответвитель 20 дБ на связанных линиях с круглыми проводниками в прямоугольном экране [3]. Направленный ответвитель представляет собой один из ключевых компонентов СВЧ-устройств и систем.

3. Структура с горизонтально-лицевой связью [2], состоящая из двух сигнальных линий с сильной связью, расположенных сверху и снизу диэлектрической подложки, окруженных копланарным заземлением. Эта конфигурация позволяет реализовать практическую схему с импедансом в несколько сотен ом для возбуждения четных мод с помощью их меньшей емкости.

4. Структура заглубленных связанных микрополосковых линий, состоящая из проводника, обычно медного, проложенного по пластине заземления, которая шире самой линии передачи и отделена диэлектрической подложкой.

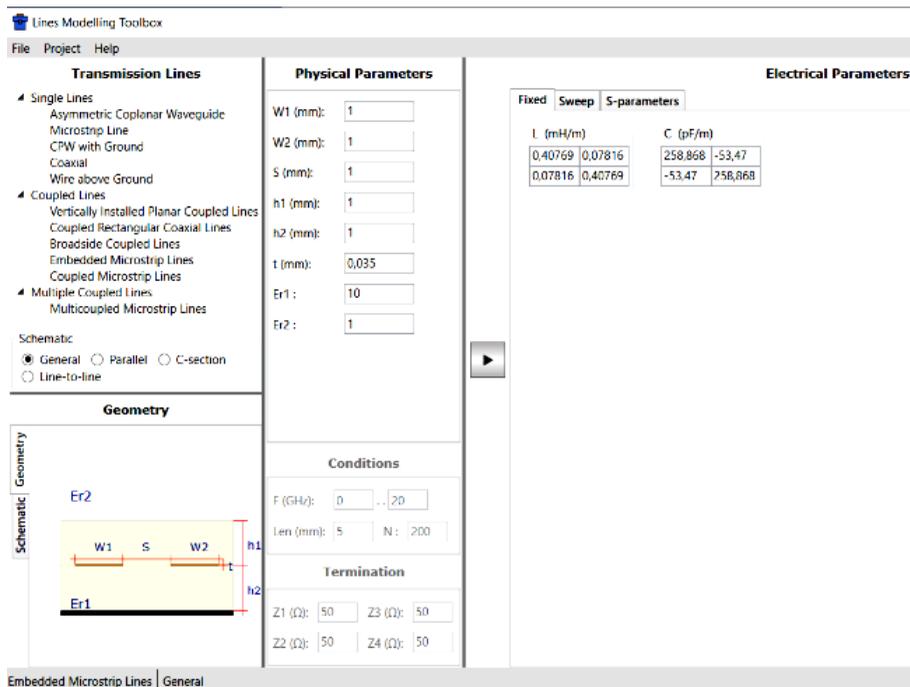


Рис. 1. Главное окно программы LMT

Таким образом, база моделируемых компонентов была дополнена четырьмя новыми моделями, что позволило расширить функциональное применение программного продукта. Данные модели были успешно протестированы с применением реальных данных в среде MatLab. LMT [1] может быть применен для реального проектирования СВЧ-устройств и проверки физической реализуемости распределенных компонентов (рис. 1).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев А.Н. Средство проектирования распределённых высокочастотных компонентов для новых радиоэлектронных систем / А.Н. Сычев, А.И. Степанюга, В.А. Бондарь, К.Б.-Б. Дагба, В.В. Анисимов // XVI МНПК «Электронные средства и системы управления». – 2020. – Ч. 1. – С. 125–128.
2. Стручков С.М. Методика конформных отображений для моделирования полосковых линий передачи и проектирование устройств на их основе / С.М Стручков, А.Н. Сычев. – Томск: ТУСУР, 2016. – 148 с.
3. Сычев А.Н. Направленный ответвитель 20 дБ на связанных линиях с круглыми проводниками в прямоугольном экране / А.Н. Сычев, С.М. Стручков, Ф.И. Шеерман // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 3. – С. 8–10.
4. Краткий обзор языка C#. MSDN [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.microsoft.com/csharp/> (дата обращения: 15.03.2022).
5. MSDN – маршаллинг взаимодействия [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/framework/interop/> (дата обращения: 15.03.2022).

УДК 621.372

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МАСШТАБИРОВАНИЯ ДЛЯ ОТРИСОВКИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧ

*В.А. Бондарь, К.Б.-Б. Дагба, А.И. Степанюга, студенты  
Научный руководитель А.Н. Сычев, проф., д.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, [ganeball9799@mail.ru](mailto:ganeball9799@mail.ru)*

Разработаны модули отрисовки поперечного сечения линий передачи для программного продукта для проектирования компонентов радиоэлектронных систем Lines Modelling Toolbox.

**Ключевые слова:** САД-программы, линии передачи, масштабирование, коэффициенты масштабирования.

Графическое представление при проектировании деталей и конструкций имеет огромное значение в повышении качества получаемой продукции. САД-программы стали неотъемлемой частью производственного процесса новых инженерных решений.

Данные программные комплексы, используемые на предприятии, способствуют:

- снижению сложности производства;
- сокращению времени подготовки проектов;
- увеличению точности изготавливаемой продукции;
- снижению расходов;
- уменьшению появления бракованной продукции.

САПР позволяет не только улучшить процесс разработки новых изделий различного типа, но и автоматизировать процесс составления проектной и конструкторской документации, а также и других документов, используемых в работе предприятия.

**Линия передачи (ЛП)** [1] – элемент цепи, при помощи которого энергия, в основном в виде электромагнитной волны, переносится из одной точки в другую. ЛП можно разделить на три класса: одиночные, которые составляют линии с потенциалом одного проводника; связанные, где используется потенциал двух проводников, и многопроводные, где присутствуют потенциалы более двух проводников [2].

ЛП применяются при проектировании устройств, использующих частоты от нуля и соответствующих оптическому диапазону, которые принимаются в различных сферах. Конструкция линии определяется по нескольким факторам. Это:

- рабочий диапазон частот;
- область применения.

При помощи использования особенностей ЛП можно спроектировать и произвести устройства разного рода. К примеру, фильтры разного применения и согласующие цепи.

**Масштабирование изображения** при работе с графическими объектами и окнами дает пользователям и разработчикам возможность для изменения тех или иных объектов. Для изменения размеров окна или же объекта следует использовать коэффициенты масштабирования, которые указывают нужное число, которое необходимо для изменения изображения либо по вертикали, либо по горизонтали. Данные коэффициенты задаются в нескольких формах:

- нормализованной;
- процентной;
- непосредственной.

В нормализованной форме за единицу будут приниматься исходные параметры изображения. Значение меньше единицы указывает на то, что данное изображение будет необходимо уменьшить или, наоборот, увеличить, если данное значение будет больше единицы. В процентной форме исходные значения будут умножаются на 100%. В

непосредственной форме новые размеры задаются в виде количества пикселей по тому или другому измерению.

Для **использования коэффициентов** масштабирования (КМ) необходимо изучить проектируемую структуру и ее набор входных параметров. Важно упомянуть, что для их реализации нужно задавать ограничения, которые способствуют наилучшему представлению структуры. Далее будут рассматриваться следующие структуры:

- коаксиальная структура;
- связанная коаксиальная линия в прямоугольном диэлектрике.

Данные структуры очень наглядно показывают разницу использования КМ, имея одинаковую форму проводника. В коаксиальной структуре диаметр проводника ( $d$ ) будет зависеть от диаметра диэлектрика ( $D$ ), т.е. при изменении диаметра проводника или диаметра диэлектрика будут наблюдаться изменения в отрисовке. Коаксиальная структура показана на рис. 1.

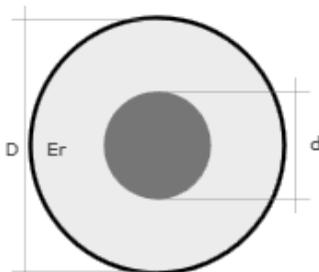


Рис. 1. Коаксиальная структура

Во второй структуре будет наблюдаться зависимость уже большего количества параметров. К примеру, при изменении параметров диэлектрика ( $a$ ,  $b$ ) диаметры проводников ( $d_1$ ,  $d_2$ ), зазоры между ними ( $s_0$ ,  $s$ ) и высоты проводников ( $h_1$ ,  $h_2$ ) будут также изменяться, но в противоположную сторону в пропорциональном отношении исходных параметров. Это правило будет при изменении всех входных параметров. Особое внимание нужно уделить высоте проводника относительно нижней границы диэлектрика. КМ высоты проводника будет зависеть от КМ высоты диэлектрика. Это позволяет нам соблюдать пропорцию в размерах и предоставлять правдивое изображение. Связанная коаксиальная линия в прямоугольном диэлектрике показана на рис. 2.

Данные модули с момента первого упоминания были оптимизированы путем передачи отдельных физических параметров, а не всех

данных по рассчитываемой структуре, добавлением новых масштабных коэффициентов и оптимизацией кода.

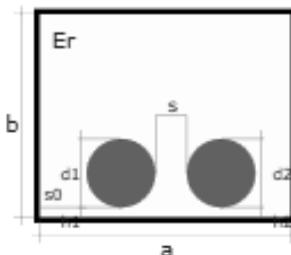


Рис. 2. Связанная коаксиальная линия в прямоугольном диэлектрике

### ЛИТЕРАТУРА

1. Фуско В. СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование / под ред. А.А. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1990. – 228 с.
2. Стручков С.М. Методика конформных отображений для моделирования полосковых линий передачи и проектирование устройств на их основе / С.М Стручков, А.Н. Сычев. – Томск: ТУСУР, 2016. – 148 с.

УДК 621.372.5

### МОДИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ ПРОСМОТРА И АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ СВЧ-ИЗМЕРЕНИЙ

*А.А. Березин, А.Р. Дягай, Е.В. Кабанова, студенты*

*Научные руководители: А.Е. Горяинов, доцент, к.т.н.;*

*А.А. Калентьев, доцент, к.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, alexsandr.berezin402@gmail.com*

Рассмотрены программа DataViewer и вкладка, отвечающая за работу с CSV-файлами. Реализована новая архитектура с применением паттерна MVVM и новой версии SDK, в которой предпочтение отдается использованию готовых библиотек, имеющих большую функциональность и повышенную надежность.

**Ключевые слова:** DataViewer, CSV, MVVM, WPF, SDK.

**DataViewer** – программа анализа и обработки СВЧ-измерений, предназначенная для быстрого графического просмотра, анализа и обработки результатов измерений СВЧ-компонентов и устройств, представленных в различных типах файлов данных [1]. Одними из типов файлов, обрабатываемых программой, являются файлы формата CSV.

**CSV-файлы** – текстовые файлы, содержащие записи со значениями, разделенными запятыми. Каждая строка в CSV-файле – это новая запись из набора записей, содержащихся в файле. Данные файлы можно создавать и редактировать в Microsoft Excel [2]. Обработка файлов формата CSV реализована во вкладке Custom Text Viewer, интерфейс которой представлен на рис. 1.

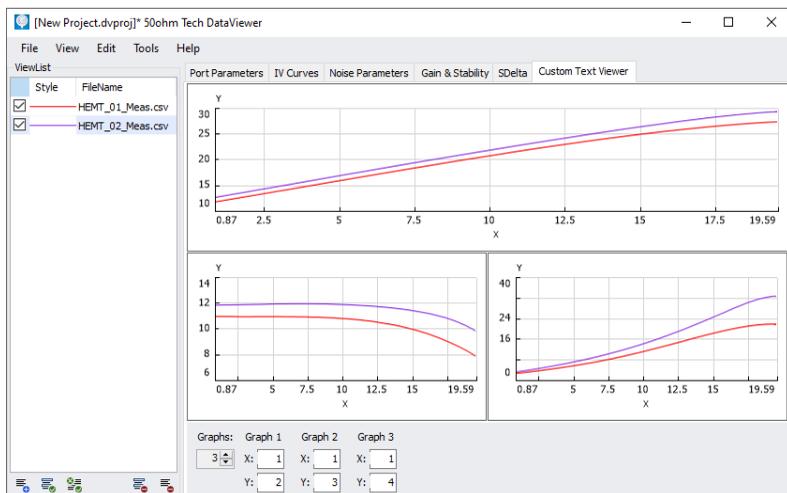


Рис. 1. Интерфейс вкладки CSV Viewer

В ходе модификации программы DataViewer поставлены задачи:

- разработка новой архитектуры программы на платформе Windows Presentation Foundation (WPF) с применением паттерна MVVM;
- переход на новую версию библиотек FiftyohmTechSDK;
- реализация на новой архитектуре вкладки CSV Viewer (аналог Custom Text Viewer).

Паттерн Model-View-ViewModel (MVVM) позволяет четко отделить бизнес-логику и модель представления приложения от пользовательского интерфейса. Поддержание чистого разделения логики приложения и пользовательского интерфейса помогает устранить многочисленные проблемы разработки и упростить тестирование, обслуживание и развитие приложения. Она также может значительно улучшить возможности повторного использования кода и позволяет разработчикам и дизайнерам пользовательского интерфейса упростить совместную работу при разработке соответствующих частей приложения [3].

Библиотеки FiftyohmTechSDK, которые использовались при реализации вкладки CSV Viewer, содержат классы для обработки результатов СВЧ-измерений, построения и отображения графиков, работы с различными единицами измерения, комплексными числами и т.д.

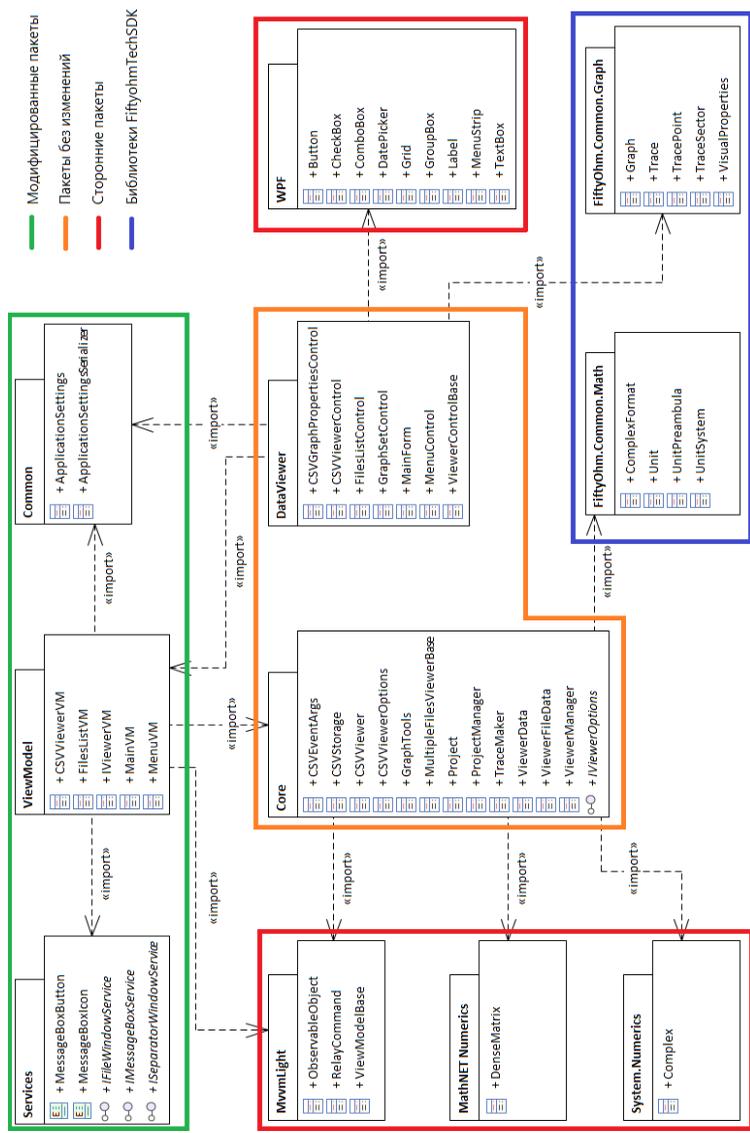


Рис. 2. UML-диаграмма пакетов программы DataViewer

Основным преимуществом новой версии SDK является изменение реализации работы с комплексными матрицами. В старой версии SDK создавались отдельные классы `ComplexMatrix2x2` и `ComplexMatrixMxN` для матриц разных размерностей, из-за чего приходилось выполнять множество различных операций преобразования типов. В новой версии SDK для работы с комплексными матрицами используется класс `DenseMatrix` из библиотеки `Math.Net Numerics`. Данный класс позволяет работать с матрицами любых размерностей, а также предоставляет намного больше возможностей при работе с матрицами [4].

Следующим значительным изменением в новом SDK является работа с комплексными числами. Вместо создания собственного класса используется класс `Complex` из библиотеки `System.Numerics` [5], добавленный в версии `.NET Framework 4.0`. В данной библиотеке реализовано множество методов для осуществления математических операций с комплексными числами. Также данный класс используется в библиотеке `Math.Net Numerics`, из-за чего отпадает необходимость проводить дополнительные операции преобразования одних комплексных чисел в другие.

Диаграмма пакетов программы `DataViewer` с использованием новой архитектуры представлена на рис. 2.

Использование паттерна `MVVM` и нового набора библиотек позволяет уменьшить связность элементов программы, упростить тестирование, обслуживание и развитие приложения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. `DataViewer` – программа для быстрого графического просмотра, анализа и обработки результатов СВЧ-измерений [Электронный ресурс]. – <https://50ohm.tech/ru/dataviewer> (дата обращения 04.03.2022).
2. `CSV File Format` [Электронный ресурс]. – <https://docs.fileformat.com/spreadsheet/csv> (дата обращения: 04.03.2022).
3. Vice R. `MVVM Survival Guide for Enterprise Architectures in Silverlight and WPF` / R. Vice, M.S. Siddiqi // Packt Publishing Ltd, 2012. – P. 77–82.
4. Березин А.А., Дягай А.Р., Кабанова Е.В. Рефакторинг модуля исключения влияния паразитных элементов при зондовых измерениях S-параметров СВЧ-компонентов // Матер. X регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», 15 окт. – 30 нояб. 2021 г. – С. 25–29.
5. `Complex Структура (System.Numerics)` | Microsoft Docs [Электронный ресурс]. – <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/api/system.numerics.complex?view=net-5.0> (дата обращения: 04.03.2022).

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ МАРКЕРОВ НА ОСНОВЕ 2D-ГРАФИКОВ SCICART

*В.С. Швоев, Н.А. Набережнев, А.А. Щедрин, студенты*

*Научные руководители: А.А. Калентьев, доцент, к.т.н.;*

*А.Е. Горяинов, доцент, к.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, shvoev.work@gmail.com*

Представлена описание процесса реализации новой функциональности в программе автоматизированного измерения и управления антенн. Показана возможность добавления, удаления и перемещения маркеров на двумерные графики, используя компонент библиотеки SciChart.

**Ключевые слова:** маркер, график, данные.

В различных САПР и специализированных приложениях существует необходимость в отображении графической информации о текущем процессе измерений и построения отчётов о выполненных измерениях. Удобной функцией при просмотре графиков является использование различных типов маркеров. В текущей реализации приложения автоматизированного измерения антенн Antest используется компонент библиотеки SciChart для отображения графиков измеряемых характеристик антенн. В текущей версии Antest нет маркеров, добавление которых значительно упростило бы анализ выполняемых измерений. Поэтому актуальной задачей является разработка подсистемы работы маркеров для библиотеки SciChart.

SciChart – это кроссплатформенный компонент для высокопроизводительных диаграмм в реальном времени и визуализации данных [1].

В библиотеке 2D-графиков SciChart существует реализация маркеров, но она применяется на каждую точку графика или на точки с определенным шагом. Также данные маркеры не имеют нужных стилей для изменения визуального отображения маркера и не позволяют создать маркер, состоящий из нескольких элементов для независимого перемещения указателя на точку графика и подписи, показывающей значения в данной точке. Поэтому было принято решение создания собственной реализации маркера, состоящего из нескольких элементов, который будет указывать на одну определенную точку графика с добавлением логики перемещения подписи и самого маркера.

Для создания пользовательского маркера были взяты разного рода аннотации из библиотеки 2D-графиков SciChart. На рис. 1 показан макет маркера.

Аннотации могут содержать интерактивные горизонтальные или вертикальные линии,

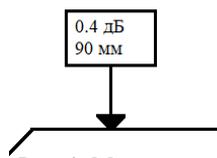


Рис. 1. Макет маркера

текст, выноски, а также измерения, такие как размах и продолжительность цикла.

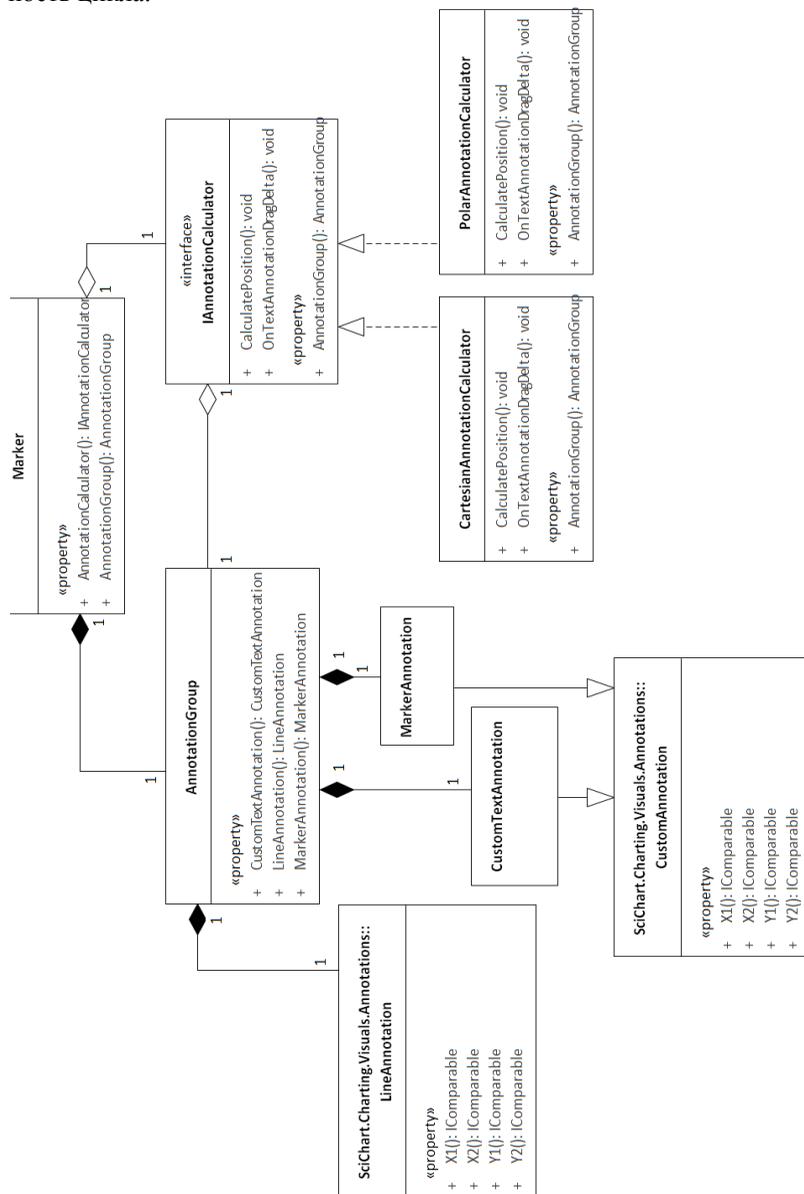


Рис. 2. Диаграмма классов реализации пользовательского маркера

SciChart предоставляет ряд встроенных аннотаций, но также возможно создавать свои собственные [1]. Были использованы следующие аннотации: два экземпляра CustomAnnotation для создания точки маркера и его подписи и LineAnnotation для соединения маркера и подписи. Данные аннотации были помещены в один общий класс AnnotationGroup для более простого использования. Также были созданы интерфейс IAnnotationCalculator для расчета расположения маркера на графике и две реализации данного интерфейса – расчет на декартовом и полярном графиках. Также был создан класс, объединяющий интерфейс подсчета расположения маркера на графике и пользовательского маркера. На рис. 2 представлена диаграмма классов реализации пользовательского маркера.

На рис. 3 представлено отображение маркера на графике.

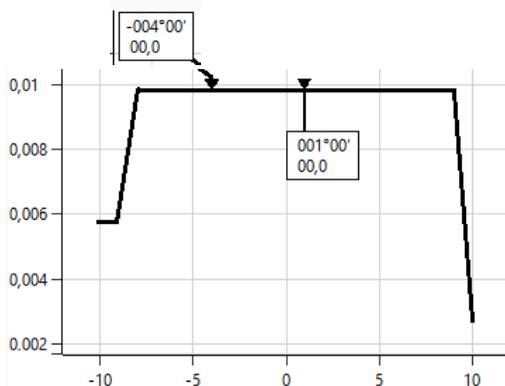


Рис. 3. Пример отображения маркера на графике

В результате удалось создать собственную реализацию маркера на основе объектов библиотеки SciChart. Благодаря тому, что каждый элемент маркера имеет собственную реализацию, появилась возможность отдельно изменять стиль каждого элемента маркера. Также благодаря созданному интерфейсу IAnnotationCalculator появилась возможность добавлять и изменять реализацию расчета положения маркера на графике, чтобы маркер мог указывать только на точки линии графика и не имел возможности перемещаться по всей плоскости графика.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Документация библиотеки 2D-графиков SciChart [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.scichart.com/documentation/win/current/SciChart\\_WPF\\_SDK\\_User\\_Manual.html](https://www.scichart.com/documentation/win/current/SciChart_WPF_SDK_User_Manual.html) (дата обращения: 05.11.2021).

## **ПОЛУЧЕНИЕ КОММУТАЦИОННОГО ТРАНЗИСТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕК МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СИНТЕЗА СВЧ-УСТРОЙСТВ**

*Ю.А. Новичкова, магистрант каф. КСУП;*

*А.А. Метель, магистрант каф. ФЭ; А.А. Щедрин,*

*Н.А. Набережнев, В.С. Швоев, студенты каф. КСУП*

*Научный руководитель А.Е. Горяинов, доцент каф. КСУП, к.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, yulya.novichkova21@gmail.com*

Представлен подход для получения дубликата коммутационного транзистора. Дубликат может быть использован в программах синтеза СВЧ-монолитных интегральных схем (МИС) и позволяет учитывать особенности конкретной интегральной технологии. Дубликат коммутационного транзистора также хранит информацию о его состояниях и используемой цепи смещения.

**Ключевые слова:** МИС, СВЧ, синтез, САПР, интеграция программного обеспечения, библиотека элементов, коммутационный транзистор.

Повышение эффективности и снижение стоимости разработки СВЧ МИС определяет тенденцию развития программных модулей для структурного и/или параметрического синтеза схемных и топологических решений. Для получения качественного первоначального приближения в результате синтеза СВЧ МИС необходимо использовать модели элементов из библиотеки элементов (PDK). Использование моделей интегральных элементов необходимо для учета паразитных эффектов конкретной интегральной технологии изготовления и учёта их в процессе синтеза. В программах синтеза, разработанных компанией 50ohm Technologies, используется подход по работе с файлами формата sNp и pdkt [1]. Ручная генерация набора исходных данных является длительным процессом и может занимать от 1 до 3 рабочих дней.

Ранее была разработана программа PDK Bridge [1], в которой реализован алгоритм автоматизированного получения параметров пассивных элементов из PDK для программы синтеза устройств с переменными состояниями (аттенюаторы, фазовращатели, коммутаторы). Однако такие устройства содержат не только пассивные элементы, но и активные, в частности, коммутационные транзисторы. Таким образом, целью настоящей работы является разработка подхода по получению дубликата коммутационного транзистора.

Схема для генерации набора данных коммутационного транзистора представлена на рис. 1. Важно отметить, что в отличие от под-

хода, использовавшегося при генерации наборов данных пассивных элементов, необходимо использовать и учитывать цепь смещения транзистора. Цепь смещения реализует работу транзистора в определенном состоянии – включенном или выключенном.

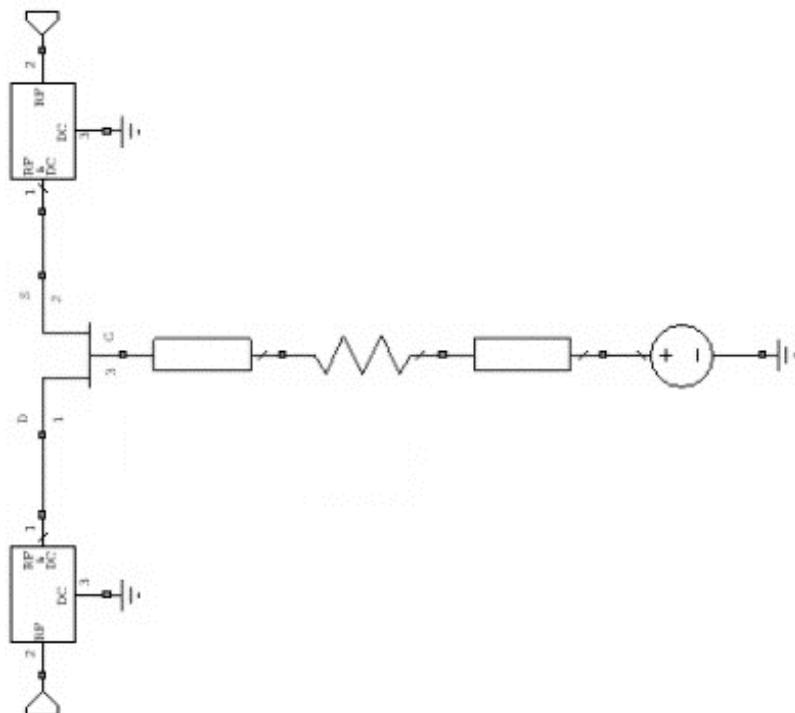


Рис. 1. Схема коммутационного транзистора

Для получения дубликата коммутационного транзистора в программе PDK Bridge был разработан следующий подход.

1. Создать в САПР схему для генерации набора данных коммутационного транзистора, согласно рис. 1.
2. Выбрать схему коммутационного транзистора в программе PDK Bridge.
3. Задать значения напряжений источника питания, соответствующие включенному и выключенному состояниям.
4. Задать варьируемые значения параметров коммутационного транзистора.
5. Сохранить дубликат библиотеки или файлы  $S$ -параметров коммутационного транзистора.

Дубликат библиотеки может хранить в себе информацию не только о выбранных коммутационных транзисторах, но и о пассивных элементах. В дубликате библиотеки также сохраняется информация о коммутационном транзисторе в двух состояниях и учитывается используемая цепь смещения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10036).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальное исследование подходов синтеза СВЧ-устройств с использованием библиотек моделей элементов / Ю.А. Новичкова, Д.В. Билевич, А.Е. Горяинов, А.А. Калентьев // Матер. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2021. – Ч. 1. – С. 29–32.

УДК 621.396.67.012.12

### **РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПОЛЯ АНТЕННЫ В ДАЛЬНЕЙ ЗОНЕ ЧЕРЕЗ ЗНАЧЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ В ПРОГРАММЕ АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ЯЗЫКЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ C#**

*А.А. Щедрин, студент*

*Научные руководители: А.А. Калентьев, доцент, к.т.н.;*

*А.Е. Горяинов, доцент, к.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, shedrin2001@gmail.com*

Представлено описание реализации алгоритма восстановления диаграммы направленности дальней зоны по измеренному амплитудно-фазовому распределению ближней зоны на языке программирования C#. Полученный алгоритм в дальнейшем будет использован в одном из модулей программы антенных измерений Antest.

**Ключевые слова:** ближняя зона, дальняя зона, диаграмма направленности, амплитудно-фазовое распределение, C#.

Для проверки параметров сверхвысокочастотных антенн проводят измерения методами ближней зоны и дальней зоны. Метод дальней зоны имеет ряд недостатков, например, необходимость большой протяженности полигона, отражения сигналов от земли и зависимость от погодных условий (для открытых полигонов). Поэтому часто для измерения параметров антенн, частота которых не превышает 50 ГГц, используют метод ближней зоны. Измерения могут проводиться на плоской, цилиндрической или сферической поверхностях. Особенностью данного метода является то, что полученные данные необходимо преобразовать. Для такого преобразования существуют математические алгоритмы [1].

Для упрощения и ускорения процесса измерений используются автоматизированные комплексы, которые состоят из передающей антенны, опорно-поворотного устройства с исследуемой антенной, векторного анализатора цепей и программного обеспечения для управления опорно-поворотным устройством и анализа измеренных данных. Одной из программ антенных измерений является Antest.

Программа Antest состоит из двух основных модулей: AntestDAQ и AntestDP. Первый выполняет измерительные функции и используется для предварительной обработки данных, а второй необходим для итоговой обработки данных и формирования отчета [2]. В текущей версии AntestDP реализован модуль для выполнения преобразования данных, измеренных в ближней зоне, в значения дальней зоны, называемой «мастером преобразования». Данный модуль имеет реализацию алгоритма преобразования данных, измеренных на плоской поверхности. Однако анализ результатов преобразования показал, что реализованный ранее алгоритм даёт большую ошибку. К тому же в связи с тем, что исходный код программы Antest является «унаследованным кодом», текущая реализация алгоритма преобразования имеет сложную структуру, а также не имеет модульных тестов.

В связи с этим было принято решение реализовать новый алгоритм для программы по известному математическому алгоритму. Так как программа Antest реализована на языке программирования C#, то и алгоритм необходимо реализовать на этом же языке. Это позволит в будущем, при необходимости, быстро вносить изменения, а также обеспечить покрытие модульными тестами.

Для программной реализации восстановления диаграммы направленности дальней зоны необходимо произвести следующие действия:

- 1) рассчитать значения  $\theta$  и  $\varphi$  итоговой сетки диаграммы;
- 2) сформировать матрицы комплексных чисел, которые будут хранить значения электрической составляющей поля, измеренных в ближней зоне, где столбцы соответствуют изменению по оси  $X$ , а строки – по оси  $Y$ . Первая матрица представляет набор значений, измеренных при горизонтальной поляризации, вторая – при вертикальной;
- 3) добавить со всех сторон матрицы нулевые значения для дальнейшей интерполяции;
- 4) для обеих матриц необходимо произвести обратный сдвиг нулевой частоты, выполнить двумерное дискретное обратное преобразование Фурье и вновь произвести сдвиг нулевой частоты, но уже к центру матрицы;
- 5) рассчитать частоты дискретизации преобразования Фурье для сигналов, равных количеству строк и столбцов соответственно, и заполнить для них нулевые частоты;

6) рассчитать интерполирующую функцию для значений каждой из матриц, используя значения частот дискретизации;

7) произвести расчет электрической составляющей в дальней зоне по формулам

$$E_{\theta} = j \frac{v}{2\pi\rho} (f_x \cos \varphi + f_y \sin \varphi),$$

$$E_{\varphi} = j \frac{v}{2\pi\rho} (-f_x \cos \varphi + f_y \sin \varphi),$$

где  $v$  – волновое число,  $\rho$  – расстояние до измеряемой антенны,  $f_{x,y}$  – интерполирующая функция.

Стандартная библиотека математических функций языка программирования C# не имеет реализации алгоритма быстрого преобразование Фурье, а самостоятельная реализация подобного алгоритма может занять большое количество времени. В связи с этим была использована сторонняя библиотека NumPy.NET [3], которая, помимо функций быстрого преобразования Фурье для одномерных и двумерных массивов, предоставляет функции расчета частоты дискретизации и сдвига нулевой частоты. Данная библиотека использует библиотеку NumPy [4] языка программирования Python и позволяет вызывать ее методы в программах, написанных на языке C#.

Результат работы алгоритма представлен графиками на рис. 1.

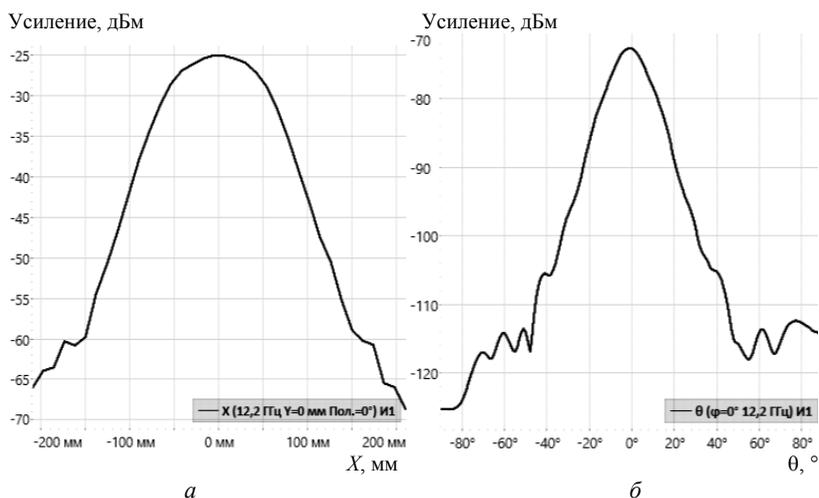


Рис. 1. Результат работы алгоритма преобразования: а – измеренные данные; б – преобразованные данные

В дальнейшем данный алгоритм будет интегрирован в модуль преобразования ближней зоны программы Antest.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Constantine A. Balanis. Antenna Theory. Analysis and design. Third edition. – John Wiley & Sons, 2005. – P. 1014–1020.
2. Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения // Матер. X регион. науч.-практ. конф., Томск, 2020. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2021. – С. 300–303.
3. Numpy.NET [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/SciSharp/Numpy.NET> (дата обращения: 06.03.2022).
4. Официальный сайт Numpy [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://numpy.org/> (дата обращения: 06.03.2022).

УДК 621.396.67.012.12

### МОДИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ ПРОСМОТРА И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

*В.С. Швоев, Н.А. Набережнев, А.А. Щедрин, студенты*

*Научные руководители: А.А. Калентьев, доцент, к.т.н.;*

*А.Е. Горяинов, доцент, к.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, shvoev.work@gmail.com*

Демонстрируется реализация формул для расчета значения и местоположения главного максимума диаграммы направленности, ширины луча по уровню минус 3 дБ, уровней боковых лепестков слева и справа от положения главного максимума на языке C# для анализа диаграммы направленности.

**Ключевые слова:** автоматизированное измерение антенн, расчеты, максимум диаграммы направленности.

Результатами сканирования в программе для автоматизированного измерения антенн Antest являются комплексные значения полученные в разных положениях антенны [1]. Для лучшего понимания качества сканирования антенн нужно получить дополнительные характеристики, которые вычисляются исходя из результатов сканирования: значения и местоположения главного максимума диаграммы направленности (в том числе измеренного методом вилки по уровню –1 дБ), ширины луча по уровню –3 дБ, уровней боковых лепестков слева и справа от положения главного максимума, уровней бокового излучения в задаваемых секторах, уровня кроссполяризации и поляризационных характеристик. На рис. 1 показаны характеристики, отображённые на графике.

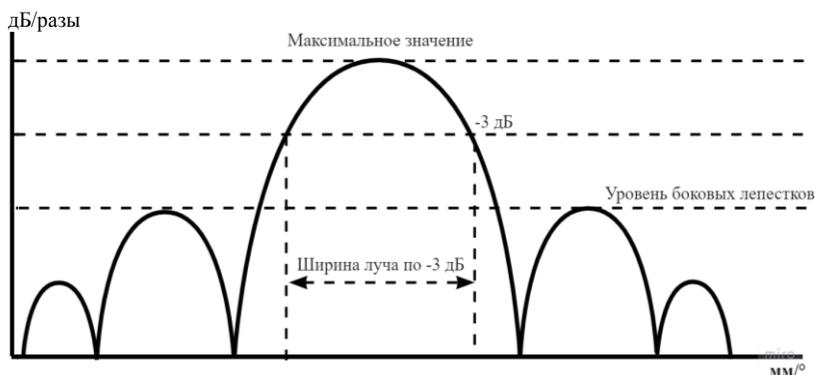


Рис. 1. Рассчитываемые характеристики

В результате появилась цель – добавление новой функциональности обработки результатов антенных измерений. Задачей стала реализация расчетов дополнительных характеристик результатов сканирования в программе Antest.

Значение и местоположение главного максимума диаграммы направленности можно найти с помощью нахождения модуля комплексных значений, полученных во время сканирования.

Ниже представлен код поиска главного максимума диаграммы направленности, реализованного с помощью языка программирования C#:

```
var list = points.Select(v => v.Y.MagnitudeSquared())
    .ToList();
var max = list.Max();
```

Переменная `points` представляет собой пользовательский тип `List<PointXC>`, содержащий в себе коллекцию точек, где свойство `X` является типом `double`, значения которого откладываются по оси абсцисс, и свойство `Y` имеет тип комплексного числа, модуль или значение фазы которого откладываются по оси ординат. Метод `Select` выбирает значения по оси ординат (комплексное число), находит их магнитуду и объединяет в одну коллекцию. Метод `Max` находит максимальное значение магнитуды.

Для нахождения ширины луча по уровню минус 3 дБ нужно определить границу относительно максимума слева и справа. Для этого начиная с главного максимума диаграммы направленности начинаем перебирать значения, удовлетворяющие условию – значение должно быть меньше максимума на 3 дБ. Ниже представлен код поиска границы луча:

```

for (var i = 0; i + 1 < points.Count; i++)
{
    var magnitude = points[i + 1].Y.Magnitude;
    if (!double.IsNaN(magnitude)
        && magnitude < searchPower)
    {
        return points[i].X;
    }
}

```

В метод подается значение усиления searchPower, переведенное из дБ в разы, все точки points с левой (все точки зеркально отражаются) или с правой стороны от максимума. Все точки перебираются и ищется первая попавшаяся точка, у которой значение магнитуды меньше искомого значения усиления.

Для нахождения луча пропускания нужно вычесть из правой границы левую:

```
beamWidth = beamR - beamL;
```

Уровни боковых лепестков слева и справа от положения главного максимума можно найти так же, как и значение главного максимума диаграммы направленности, предварительно убрав все значения ширины луча по уровню  $-3$  дБ. Ниже представлен код поиска уровня боковых лепестков:

```

var right = points.Skip(maxPowerIndex);
right = AntestMath.FindExtremums(right, excursion)
    .OrderByDescending(x => x.Y.Magnitude);
var left = points.Take(maxPowerIndex - 1).Reverse();
left = AntestMath.FindExtremums(left, excursion)
    .OrderByDescending(x => x.Y.Magnitude);
left = left.Where(x => maxPower / x.Y.Magnitude > minLobe);
right = right.Where(x => maxPower / x.Y.Magnitude > minLobe);
var values = new[] {double.NaN, double.NaN, double.NaN};
var sideLobeLevel = double.MinValue;
sideLobeLevel = GetSideLobeLevel(left,
    sideLobeLevel, ref values[0]);
sideLobeLevel = GetSideLobeLevel(right,
    sideLobeLevel, ref values[1]);

```

Метод Skip пропускает указанное число элементов. Метод AntestMath.FindExtremums ищет экстремумы в указанном массиве точек. Метод Take берет все элементы коллекции до определенного индекса. Метод Where выбирает все значения экстремума, которые не являются значениями главного максимума. Метод GetSideLobeLevel выбирает максимальное значение из всех максимумов.

Реализация уровней бокового излучения в задаваемых секторах, уровня кроссполаризации и поляризационных характеристик является следующей задачей.

В результате внедрение данных формул в программу Antest позволяет охарактеризовать поведение антенн.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Щедрин А.А., Набережнев Н.А., Швоев В.С. Реорганизация архитектуры классов графиков программы Antest // Матер. X регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения – 2021». – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2021. – С. 300–303.

УДК 621.396.67.012.12

### МОДИФИКАЦИЯ ПРОГРАММЫ ПО АВТОМАТИЗАЦИИ АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

*Н.А. Набережнев, А.А. Щедрин, В.С. Швоев, студенты*

*Научные руководители: А.Е. Горяинов, доцент, к.т.н.;*

*А.А. Калентьев, доцент, к.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, supovik@gmail.com*

Представлен процесс модификации программы по автоматизации управления антенными измерениями. Описанные изменения расширяют возможности конечного пользователя для анализа измеренных данных, представленных в виде двухмерных декартовых и полярных графиков.

**Ключевые слова:** антенные измерения, двухмерные графики, WPF, SciChart.

При проведении измерений с целью проверки характеристик антенны необходимо менять её позицию в пространстве, варьируя такие характеристики, как крен, азимут, вынос и др. Это перемещение производится с помощью нескольких опорно-поворотных устройств (ОПУ), на планшайбу которого и прикреплена измеряемая антенна.

Программа Antest позволяет автоматически проводить эти перемещения, измерять и записывать данные о работе антенны в пройденных положениях с целью их дальнейшего анализа. Также приложение отображает эти данные в виде двухмерных графиков трех типов: тепловая карта, декартов и полярный. На последних двух пользователь может просматривать результаты сканирования [1].

В более ранней версии программы данный элемент был реализован с помощью библиотеки System.Windows.Forms.DataVisualization.dll. Данное решение использует элемент из фреймворка Windows Forms, хотя приложение написано на Windows Presentation Foundation (WPF). Также немаловажно, что у заказчика уже имеется лицензия сторонней библиотеки для работы с графиками SciChart. Ниже перечислены основные недостатки старой версии реализации графиков:

– Использование WinForms в WPF является нежелательным, т.к. это разные технологии и приложения на этих фреймворках строятся по разным принципам;

– Отсутствует большое количество встроенных функций, которые есть у SciChart, что усложнит добавление новых функций в данный модуль программы;

– Затруднительная работа со стилями и другие проблемы WinForms, которые были решены в WPF.

Исходя из вышеперечисленных недостатков, в новой версии программы был осуществлен переход на библиотеку SciChart, имеющую большие возможности для реализации графиков в программе, а также создана гибкая, расширяемая архитектура классов графиков, в которую при необходимости можно добавить класс новой системы координат или новой реализации маркера, не изменяя остальные части архитектуры [2].

С помощью имеющихся в библиотеке SciChart аннотаций (визуальных элементов, которые могут состоять из линий, фигур, текста, а также других аннотаций) и механизмов работы с ними были реализованы маркеры. Были использованы следующие аннотации: два экземпляра CustomAnnotation для создания точки маркера и его подписи и LineAnnotation для соединения маркера и подписи. Данные аннотации были помещены в один общий класс AnnotationGroup для более простого использования. Также был создан интерфейс IAnnotationCalculator для расчета расположения маркера на графике и две реализации данного интерфейса – расчет на декартовом и полярном графиках. Также был создан класс объединяющий интерфейс подсчета расположения маркера на графике и пользовательского маркера. На рис. 1 представлен пример отображения маркера в Antest [1].

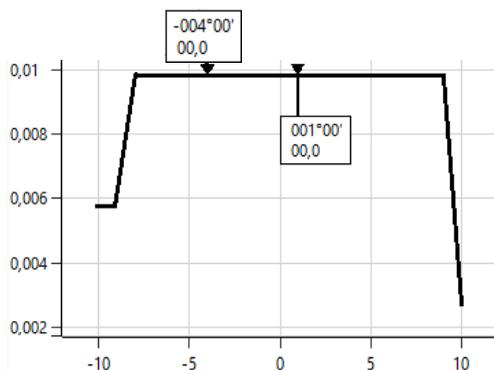


Рис. 1. Пример отображения маркера в Antest

В качестве одной из возможностей в программе было необходимо реализовать масштабирование линейных графиков и сохранение масштаба при переключении между разными типами графиков.

В первую очередь было реализовано сохранение масштаба между графиками с разными типами оси ординат на декартовом графике одного среза: был использован словарь (далее – словарь масштабов) с ключом-элементом перечисления типов графиков, и значением – структурой, хранящей масштаб, соответствующий выбранному типу.

Далее с помощью еще одного словаря, ключ в котором представляет собой название оси среза, а значение – класс, хранящий в виде свойства словарь масштабов, было реализовано сохранение масштабов при переключении между графиками разных осей.

Так как полярный график имеет фиксированный масштаб по оси абсцисс, его масштабирование возможно только по оси ординат. Для сохранения масштабов при полярном отображении также используется словарь, ключом является элемент перечисления типа отображения графика, а значением – второй словарь [1].

В результате проделанной работы в программе Antest были добавлены новые инструменты для анализа антенных измерений в соответствии с пожеланиями заказчика. Модификации графиков расширяют возможности пользователя по анализу полученных в ходе работы программы данных.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Набережнев Н.А., Щедрин А.А., Швоев В.С. Реализация сохранения масштабов графиков при их переключении в программе автоматизированного измерения антенн // Матер. X регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», Томск, 15 окт. – 30 нояб. 2021 г. – С. 99–102.

2. Набережнев Н.А., Щедрин А.А., Швоев В.С. Реорганизация архитектуры классов графиков программы Antest // Матер. X регион. науч.-практ. конф. «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения», Томск, 15 окт. – 30 нояб. 2021 г. – С. 300–303.

УДК 621.396.67

## **РЕОРГАНИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ МОДУЛЯ РАСЧЕТА ПОЛЯ АНТЕННЫ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ ЧЕРЕЗ ЗНАЧЕНИЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ В ПРОГРАММЕ АНТЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

*А.А. Щедрин, Н.А. Набережнев, В.С. Швоев, студенты*

*Научные руководители: А.А. Калентьев, доцент, к.т.н.;*

*А.Е. Горяинов, доцент, к.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, каф. КСУП, shedrin2001@gmail.com*

Представлено описание процесса реорганизации классов модуля восстановления диаграммы направленности в дальней зоне по измеренному амплитудно-фазовому распределению в ближней зоне.

Реорганизация упростит добавление новых алгоритмов в модуль, а также тестирование программы модульными тестами.

**Ключевые слова:** архитектура классов, ближняя зона, дальняя зона.

Antest – программный комплекс автоматизированного управления опорно-поворотным устройством и измерения антенн. Программный комплекс состоит из двух программ: AntestDAQ и AntestDP. Первая выполняет измерительные функции, а также используется для обработки, предварительного отображения и сохранения результатов измерения. AntestDP, в свою очередь, предназначена для итоговых преобразований измеренных данных и формирования отчета [1].

Одним из преобразований, реализуемых в AntestDP, является восстановление диаграммы направленности в дальней зоне по измеренному амплитудно-фазовому распределению в ближней зоне. Ближняя зона и дальняя зона заданного источника электромагнитного излучения – это термины, обычно используемые при антенных измерениях и при описании областей пространства вокруг такого источника, в которых различные составляющие поля играют большую или меньшую роль. Для проверки характеристик антенн измерения, как правило, производят в ближней зоне, после чего по полученным данным, используя математические алгоритмы, восстанавливают диаграмму направленности дальней зоны [2].

Для выполнения восстановления диаграммы направленности в программе реализован модуль, называемый «мастером преобразования ближней зоны», который представляет собой окно с вкладками, где пользователь может указать необходимые в преобразовании параметры. Так при преобразовании используются следующие параметры: диапазон восстановленной диаграммы направленности, шаг по указанному диапазону, сечение полученной диаграммы (при необходимости), а также частота измерения, по которой необходимо производить восстановление. Одна из вкладок «мастера преобразования ближней зоны» представлена на рис. 1.

Текущая реализация модуля преобразования предназначена для восстановления диаграммы по данным, измеренным на плоской поверхности, и все алгоритмы математических расчетов реализованы в одном классе.

Для возможности дальнейшего расширения модуля формулами преобразования на цилиндрической и сферической поверхностях, а также для возможности покрытия математических формул модульными тестами реализована следующая архитектура, представленная на рис. 2.

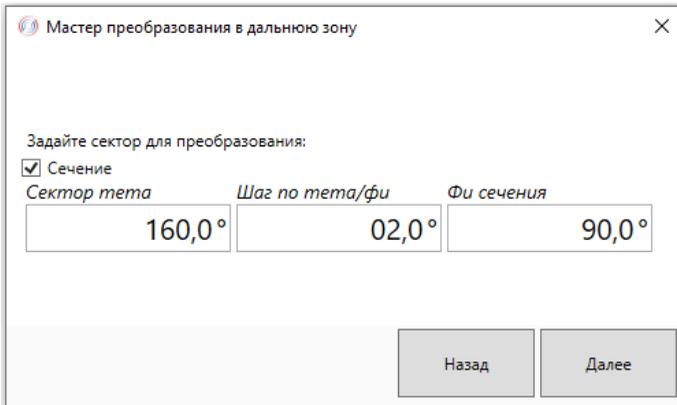


Рис. 1. Вкладка задания диапазона дальней зоны окна преобразования

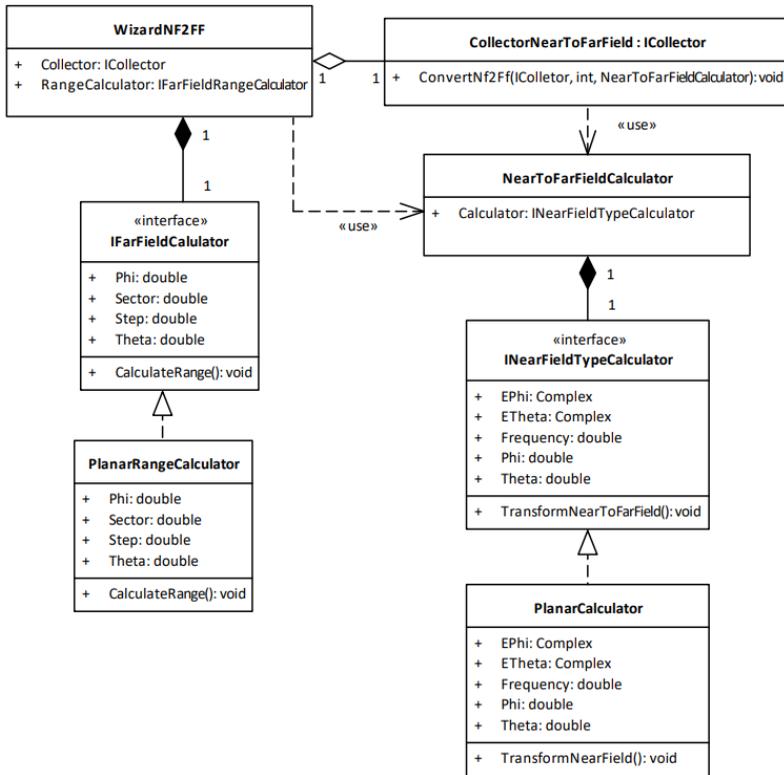


Рис. 2. Диаграмма классов реорганизованной архитектуры модуля преобразования

Как видно из диаграммы классов, реализация интерфейсов позволяет добавлять в программу новые алгоритмы преобразования путем создания классов, которые реализуют интерфейсы `IFarFieldRangeCalculator` для расчета размера итоговой диаграммы и `INearFieldTypeCalculator` для преобразования данных. При этом устраняется необходимость внесения крупных изменений в остальные классы программы.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения // Матер. X регион. науч.-практ. конф., Томск, 2020. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2021. – С. 300–303.
2. Constantine A. Balanis. Antenna Theory. Analysis and design. Third edition. – John Wiley & Sons, 2005. – P. 1014–1020.



## 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.;*  
*зам. председателя – Романовский М.Н., доцент каф. КУДР, к.т.н.*

УДК 53.09

#### ОБЗОР АРХИТЕКТУРЫ GaN-СВЕТОДИОДОВ

*С.С. Сафонов, Д.М. Морозова,*

*Д.Д. Кривошеина, 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, stas\_2003s@mail.ru*

Приведены результаты литературного обзора архитектуры GaN-светодиодов. Рассмотрены конструкции светодиодов с горизонтальной и вертикальной архитектурой. Проведено сравнение конструкций светодиодов, изготовленных по технологиям «Lift-Off» и «Flip-Chip» и проведен анализ их преимуществ и недостатков.

**Ключевые слова:** светодиод, нитрид галлия, технология.

В последние годы светодиодное освещение стало альтернативой традиционным лампам накаливания благодаря низкому энергопотреблению и долговечности. Такое освещение является экологически чистым, стабильным, эффективным, безопасным и постепенно превращается в зрелую индустрию полупроводникового освещения [1]. Однако оставались вопросы по выбору наиболее оптимальной конструкции светодиодов.

**Горизонтальная конструкция.** Как известно, производство светодиода начинается с эпитаксиального роста GaN на сапфировой под-

ложке [2]. При условии горизонтальной конструкции светодиодов (рис. 1, *a*), сапфир остается частью GaN-светодиодов. Контакты должны быть расположены на верхней стороне светодиодной матрицы, в результате электроды перекрывают часть выходного излучения.

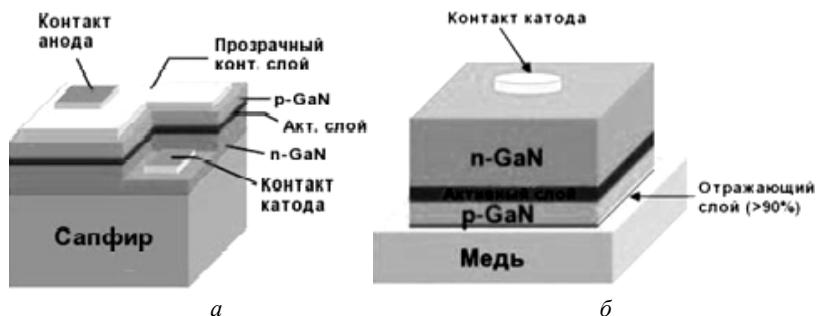


Рис. 1. Схемы горизонтальной (*a*) и вертикальной (*б*) структуры

Кроме того, при горизонтальной конструкции однородность силовых линий тока нарушалась, возникал так называемый эффект «бутылочного горла». Это приводило к дополнительному перегреву структуры, что также понижало эффективность светодиодов с такой архитектурой.

**Вертикальная конструкция.** В этом случае (рис. 1, *б*) сапфир заменяется на подложку из токопроводящего материала. Поскольку один электрический контакт является непосредственно подложкой, в конструкции вертикальных светодиодов экономится 10% светящейся поверхности. Это позволяет увеличить эффективность выхода светового потока из активной области светодиода. Кроме того, при вертикальной конструкции пространственное распределение тока внутри светодиода однородно, что позволяет увеличить рабочий ток через диод по сравнению с горизонтальной конструкцией. Увеличение тока приведёт к увеличению мощности, следовательно, можно будет уменьшить количество элементов светодиодных матриц без уменьшения светового потока. Увеличению рабочего тока будет способствовать металлическая подложка, так как она будет обеспечивать лучший теплоотвод.

Для создания светодиодов с вертикальной структурой перед размещением светодиодного кристалла на медный теплоотвод необходимо удалить сапфировую подложку. Отделение кристалла GaN от сапфира происходит при облучении мощным импульсом лазера с обрат-

ной стороны подложки. Эта операция называется «Laser lift-off process».

**Технология «Lift-Off».** Эта технология применяется в производстве голубых светодиодов высокой яркости на основе GaN, служащих для создания высокоэффективных источников освещения. Суть технологии заключается в том, что GaN-гетероструктура, выращенная на сапфировой подложке, под воздействием лазерного импульса отделяется от сапфировой подложки и переносится на другую – токопроводящую и теплопроводящую подложку, что приводит к существенному (~30%) повышению светоотдачи светодиода по сравнению со светодиодом на сапфировой подложке [3].

Однако при этом происходит разложение GaN на металлический галлий и азот, взрывообразное выделение которого приводит к отрыву полупроводника от сапфировой подложки, что может приводить к дополнительному дефектообразованию и даже к разрушению кристалла. Существуют менее разрушительные технологии, например, использование лазерных пучков с плосковершинным распределением интенсивности и др.

**Технология «Flip-Chip».** Эта технология является относительно новой технологической концепцией в области светодиодов, но она получила широкое распространение. Данная технология обладает преимуществами высокой производственной эффективности, низкой стоимости устройства и высокой надежности [4].

На рис. 2 показана конструкция такого светодиода. При технологии перевернутого кристалла свет (8) проходит через сапфир (2) из активной области светодиода (1). Контактные площадки (3) кристалла (1) присоединяются к токопроводящим дорожкам (4) светодиодной матрицы. В качестве подложки и теплоотвода выступает металлокерамическая пластина, обеспечивающая хороший теплоотвод. Кристалл светодиода крепится к подложке с помощью адгезионного материала (5). В качестве подложки и теплоотвода выступает металлокерамическая пластина, обеспечивающая хороший отвод тепла (7) от кристалла к теплоотводу.

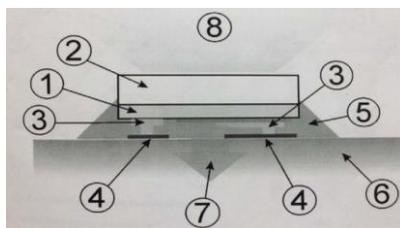


Рис. 2. Конструкция Flip-Chip

Результаты испытаний светодиодов, изготовленных по технологии «Flip-Chip», показывают, что при тех же параметрах кристалла, но изготовленных по технологии «Lift-Off», светодиод с перевернутым кристаллом имеет большую площадь излучения и лучший теплоотвод.

После того как светодиод установлен на подложке с помощью такой технологии, для снятия сапфировой подложки используется метод лазерного воздействия. Затем поверхность делают шероховатой с помощью фотолитографии на открытом слое GaN N-типа.

Flip-Chip должен изготавливаться электродами вниз по сравнению с Lift-Off. Эта конструкция заставляет предъявлять особые требования на некоторых этапах процесса, что усложняет технологию. Например, омический контактный слой должен иметь высокую отражательную способность, чтобы свет, направленный на поверхность электрода чипа, мог отражаться обратно на сапфировую сторону в максимально возможной степени, чтобы обеспечить хорошую эффективность вывода света.

Архитектура Flip-Chip светодиода должна реализовывать равномерное протекание электрического тока, т.е. иметь вертикальную конструкцию. Процесс производства пластин, травление GaN (травление Mesa), изготовление контактного слоя N-типа, изготовление пассивирующего слоя, изготовление металлического припоя в основном такие же, как и для других конструкций.

**Заключение.** Анализ литературных источников и тенденций развития технологий изготовления GaN-светодиодов показал, что наиболее перспективной архитектурой светодиодных гетероструктур является архитектура, реализуемая по Flip-Chip-технологии. В качестве основных преимуществ этой технологии по сравнению с другими являются: уменьшение количества операций сборки – в одном процессе монтажа флип-чипов формируются механические и электрические соединения кристалла с подложкой (нет необходимости в операции разварки кристаллов); эффективное использование площади подложки, так как все контакты находятся под кристаллом; отсутствие проволочных соединений между кристаллом и подложкой, что значительно снижает возникновение паразитных индуктивных и ёмкостных связей; улучшение эффективности и тепловых характеристик, излучающих гетероструктур.

В то же время необходимо учитывать и те ограничения, которые накладывает технология Flip-Chip-монтажа: необходимость использования более высокоточного оборудования, чем в случае применения традиционных методов монтажа и разварки кристаллов; сложность либо невозможность ремонта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шуберт Ф. Светодиоды / пер. с англ.; под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
2. Горизонтальная и вертикальная структура светодиодов [Электронный ресурс]: сайт stoodwod.ru. – URL: [https://studwood.ru/2106136/tovarovedenie/gorizontalnaya\\_vertikalnaya\\_strukturny\\_svetodiiodov](https://studwood.ru/2106136/tovarovedenie/gorizontalnaya_vertikalnaya_strukturny_svetodiiodov) (дата обращения: 10.03.2022).
3. Процесс Lift-off в светодиодах на основе нитрида галлия [Электронный ресурс]. – allbest.ru. – URL: [https://revolution.allbest.ru/manufacture/00345963\\_0.html](https://revolution.allbest.ru/manufacture/00345963_0.html)
4. Технология флип-чип-монтажа кристаллов [Электронный ресурс]. – сайт liontech.ru. – URL: <https://liontech.ru/infocenter/arh/meroprijatija/trening-v-germanii-tehnologiya-flip-chip-montazha-kristallov/>

УДК 53.087

### **БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА И ТЕРАПИЯ СТРЕССОВЫХ СОСТОЯНИЙ ЧЕЛОВЕКА РАДИОИЗОТОПНЫМ МЕТОДОМ В СРЕДЕ LABVIEW**

*Р.А. Кусаинов, А. Неустроев, студенты каф. КУДР*

*Научный руководитель С.Г.Еханин, доцент каф. КУДР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, fun\_ruslan1995@mail.ru*

Описан принцип работы программного обеспечения в среде Lab-View для устройства бесконтактной диагностики и терапии стрессовых состояний пассивным радиоизотопным методом.

**Ключевые слова:** стресс, диагностика, пассивный радиоизотопный метод.

Существуют различные методы диагностики хронического стресса: измерение физиологических характеристик; измерение электроэнцефалограмм; спектральный анализ звука голоса; анализ некоторых веществ, являющихся индикаторами стресса, и др. [1]. Перечисленные методы требуют подсоединения к человеку большого количества проводов и электродов или проведения дорогостоящих биохимических анализов. Таким образом, возникает актуальность разработки бесконтактных методов в проведение диагностики стресса человека в режиме online.

В работе [2] был предложен бесконтактный метод БОС, основанный на статистическом анализе естественного радиоактивного излучения человека, обусловленного, в частности, наличием в крови радиоактивного изотопа  $^{40}\text{K}$ . Организм человека обладает некоторым количеством радиоактивных веществ. В частности, в крови содержится

сы радиоактивный изотоп калия  $^{40}\text{K}$ . В среднем в организме взрослого человека содержится 150 г калия, в состав этой массы входят и изотопы. Содержание  $^{40}\text{K}$  в природной смеси изотопов калия 0,0118% по массе. При распаде  $^{40}\text{K}$  содержится в 1 г калия, испускается 26,2 бета-частиц в 1 с (89% актов распада) и 3,4 гамма-кванта (11% актов распада).

При изменении активности органов будет наблюдаться изменение интенсивности радиоактивного излучения.

Для реализации компьютерной системы бесконтактной диагностики и терапии требуется создать соответствующее программное обеспечение. В данной статье будет рассматриваться возможность создания ПО в среде LabView.

LabView – это кроссплатформенная среда разработки для выполнения различных программ, которая является одним из главных продуктов американской компании National Instruments [2]. На данный момент LabView уже используется для управления техническими процессами и техническими объектами. До начала работы программ-имитатор принимает исходные данные из раздела управления и файлового раздела. Затем, исходя из полученных начальных данных, под-программа генератора случайных чисел начинает генерировать числа, после чего происходят проверки на превышение предела и операции по выводу данных на экран, параллельно записывая необходимые данные в текстовый файл-отчет. Лицевая панель – визуальная часть программы, с которой работает пользователь. Лицевая панель представлена на рис. 1.

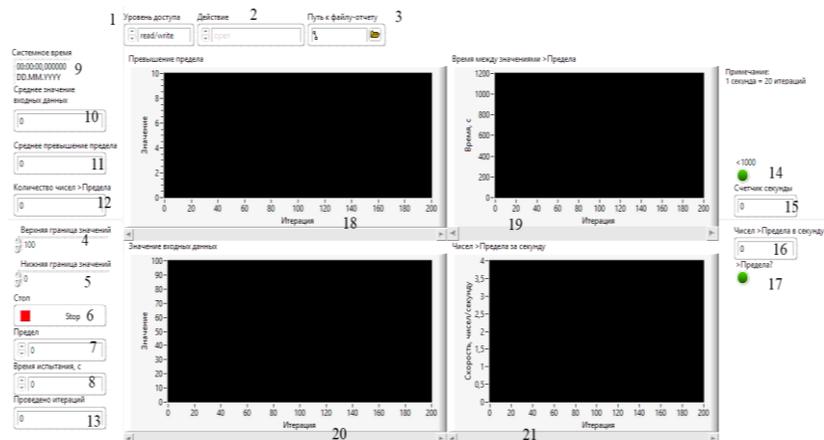


Рис. 1. Вид лицевой панели

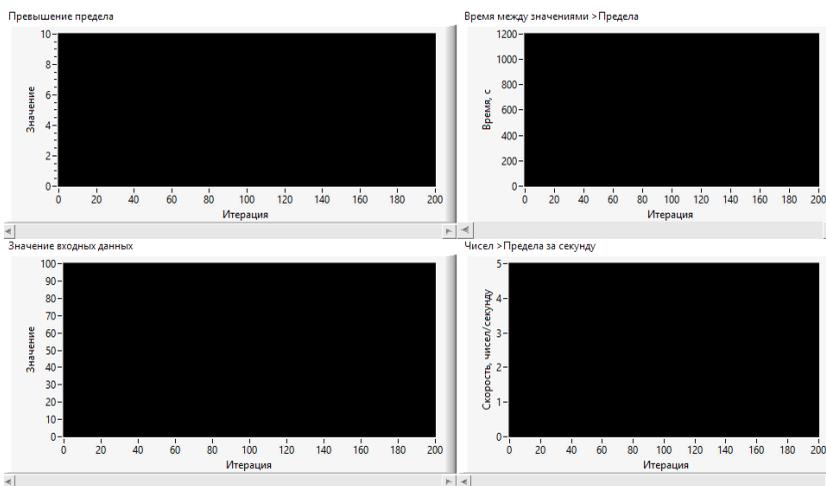


Рис. 2. Вид графического раздела

Графический раздел состоит из 4 графиков, 7 выводов и 2 индикаторов (рис. 2). Графики выводят следующие данные: «значение входных данных» отображает изменения генерируемых данных, «превышение предела» – величину превышения числом предела, «чисел» предела за секунду» – количество чисел, превысивших предел как минимум на  $10^{-6}$ , «время между значениями» предела» – время в высшей точке (на пике), прошедшее с последнего превышения числом предела.

Перед началом работы программы происходит процесс инициализации: поиск существующего файла-отчета, требуемых операций над ним и получение границ и предела. Затем начинается работа программы: генерация случайного числа, проверка этого же числа на превышение предела, начало отсчета времени до следующего превышения и запись полученных данных. Также производятся расчеты (в качестве примера) среднего арифметического значения сгенерированного числа и среднее превышение предела, получение и вывод системного времени, счет количества превышающих предел чисел и итераций. Помимо вывода данных на экран, программа в конце каждой итерации производит запись данных в .txt документ. Это означает, что программу можно прервать в любой момент и данные при этом не будут утеряны. Сами данные записаны в строки.

На данный момент создана программа, имитирующая работу датчика и часть ПО для бесконтактной диагностики, и терапии стрессовых состояний человека радиоизотопным методом (рис. 3).



этом полная беспорядочность интенсивности распада становится строго периодичной, что является одним из отличительных свойств дискретного временного кристалла.

**Ключевые слова:** дискретный временной кристалл, лазерное излучение.

Кристалл во времени – это необычная физическая концепция, теоретически предложенная Ф. Вильчеком [1] как иллюстрация спонтанного нарушения инвариантности законов физики от времени. Это такая система, в которой в состоянии с наименьшей энергией и без какого-либо внешнего воздействия спонтанно возникало бы внутреннее движение. Быстро выяснилось, что такая система невозможна в своей исходной формулировке. Однако совсем недавно физики предсказали, что если вместо непрерывного течения времени взять его дискретный аналог, такая «кристаллизация» во времени уже не будет ничему противоречить [2].

В одной из работ по изучению дискретного временного кристалла [2], на 10 отдельных ионах иттербия, пойманных в ловушку и висящих в пространстве с помощью лазерного пинцета на расстоянии три микрона друг от друга, воздействовали лазерными импульсами на спиновые моменты этих атомов либо сразу на все, либо на каждый ион независимо. Управление спинами осуществлялось с помощью циклических воздействий короткими импульсами лазерного света или микроволнового излучения. В каждом цикле длительностью  $t$  был импульс воздействия, синхронно поворачивающий все спины на строго определенный угол. Это тот самый четко отмеренный удар по системе.

И теперь вместо плавной эволюции системы с настоящим временем можно изучать то, как она ведет себя в дискретном времени, через несколько «прыжков» по времени на величину  $t$ . Это означает, что в системе самопроизвольно запускается долгопериодическое движение с периодом  $T$ , который не равен, а в несколько раз превышает  $t$ .

В кристалле в дискретном времени отношение  $T/t$  обязано оставаться неизменным даже при небольших искажениях системы, т.е. кристалл во времени должен обладать «жесткостью» колебаний частоты во времени. Это относится к ситуации, когда система из многих взаимодействующих частиц находится не в полной изоляции, а испытывает строго периодические толчки, внешнее воздействие с периодом  $t$ .

Основной целью данной работы является исследование термина «темпоральный кристалл», изучение свойств кристаллов в дискретном времени (discrete time crystal) и исследование возможности поиска новых видов кристаллических структур со свойствами темпоральных кристаллов.

**Экспериментальная часть.** Ранее в наших исследованиях наблюдался эффект влияния циркулярного поляризационного лазерного излучения на интенсивность распада нестабильных изотопов калия [4]. Эффект влияния лазерного излучения на интенсивность распада радиоактивного изотопа калия связывался с изменением спиновых состояний ядер под действием циркулярно-поляризованного лазерного излучения [4, 5].

При проведении исследований кристаллов KCl в качестве темпоральных кристаллов ожидается, что при кратковременном воздействии лазера будет изменяться спиновая ориентация электронных оболочек и ядер изотопов  $K^{40}$ , что может послужить причиной колебаний интенсивности распадов и возникновения, как и в других темпоральных кристаллах, жестких колебаний с собственной частотой.

Измерение проводилось в течение 4 ч: 1 ч – измерялось излучение без воздействия лазера (фон); 2 ч – в начале часа проводилось 5-минутное воздействие лазером и далее наблюдалось состояние кристалла; 3 и 4 ч – продолжение измерения последствия без воздействия лазером. Далее экспериментальные данные заносились и обрабатывались в MS Excel: строились сравнительные графики и проводился анализ этих графиков.

**Обработка и анализ результатов эксперимента.** Как показали измерения, интенсивность распада в течение первого часа менялась хаотически и не наблюдалось никакой упорядоченности. В начале второго часа было произведено 5-минутное воздействие на кристалл лазерного излучения.

На рис. 1 приведены результаты исследования изменения интенсивности радиоактивного излучения во втором часу опыта, после осуществления 5-минутного воздействия лазерным излучением (лазерное излучение зеленого цвета длиной волны 532 нм).

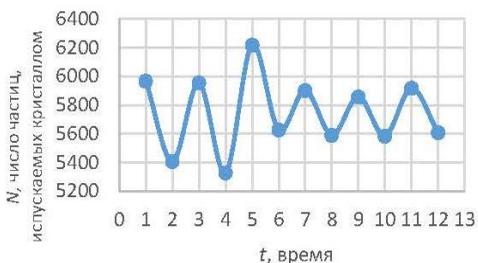
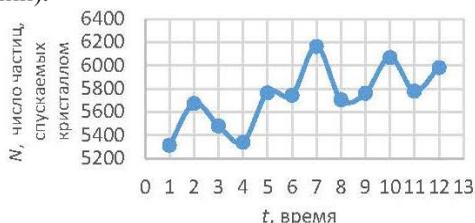


Рис. 1. Второй час исследования (воздействие лазерного излучения), разбитый на пятиминутки

Из рис. 1 видно, что временной ряд, показывающий изменение интенсивности радиоактивного излучения во времени, приобрел периодические изменения (колебания).

Возникшие в результате воздействия лазером изменения интенсивности радиоактивного излучения имеют строго поддерживающийся период  $T = 2t$ , где  $t = 5$  мин (время воздействия лазерного излучения). Как видно из рис. 1, такие колебания продолжались в течение всего 2 ч эксперимента (60 мин).

Рис. 2. Третий час исследования (последствие), разбитый на пятиминутки



Третий час эксперимента был посвящен изучению эффекта релаксации кристалла. На рис. 2 представлены данные изменения радиоактивности кристалла за третий час исследования. Эффект колебания в самом начале релаксации еще действует, однако уже на отметке 15 мин полностью исчерпывает себя. После отмеченного участка наступает беспорядочное изменение радиоактивности, которое наблюдалось в течение 1-го часа эксперимента (до воздействия лазерного излучения).

Как видно из рис. 2, общая тенденция изменения радиоактивности носит возрастающий характер, что согласуется с данными статьи [4], в которой показано, что после воздействия лазера интенсивность распада увеличивается и то, что увеличение радиоактивности обусловлено изменением спиновых моментов ядер радиоактивных изотопов.

**Закключение.** Таким образом, показано, что лазерное излучение влияет на спиновое состояние ядер радиоактивных изотопов, заставляя их синхронно изменяться, что и возбуждает коллективные колебания спинов, аналогичные таким же колебаниям, что и в дискретных временных кристаллах. Вследствие этого кристалл KCl с естественными радиоактивными примесями имеет все свойства темпорального кристалла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Wilczek F. Quantum Time Crystals // Physical Review Letters. – 2012. – Vol. 109, No. 16. – P. 160401.
2. Созданы «кристаллы в дискретном времени» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://elementy.ru/novosti\\_nauki/432955/Sozdany\\_krystally\\_v\\_diskretnom\\_vremeni.html](https://elementy.ru/novosti_nauki/432955/Sozdany_krystally_v_diskretnom_vremeni.html), свободный (дата обращения: 14.02.2022).
3. Грушина А. Рябь времени, или Когда физика лучше фантастики // Наука и жизнь. – 2017. – № 6. – С. 10–13.

4. Надеев П.А., Швадленко А.А. Воздействие лазерного излучения на распад радиоактивного изотопа калия // Сборник избр. статей научной сессии ТУСУР (Томск, 19–21 мая 2021 г.): в 3 ч. – Томск: В-Спектр, 2021. – Ч. 1. – С. 137–139.

5. Оганесян Ю.Ц. Исследование структуры ядер с помощью лазерного излучения / Ю.Ц. Оганесян, Ю.П. Гангрский, Б.Н. Марков // Матер. Всесоюз. школы по применению лазеров в атомной, молекулярной и ядерной физике. – Вильнюс, 1981. – С. 1–8.

УДК 616.831-005.1

## АЛГОРИТМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАЦИЕНТА С ТРЕНАЖЕРОМ КОГНИТИВНЫХ И РЕЧЕВЫХ СПОСОБНОСТЕЙ

*С.С. Долматова, Д.С. Зайганов, студенты каф. КИПР;*

*Ю.Ф. Савчук, студент каф. ПрЭ*

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

*Проект ГПО КИПР-2103. Домашний тренажёр когнитивных  
и речевых способностей*

*г. Томск, ТУСУР, sabina-dolmatova@mail.ru, ikolt456@gmail.com,*

*Zayanov\_dm@mail.ru*

Рассматривается разработка алгоритма работы программы домашнего тренажера когнитивных и речевых способностей у пациентов, перенесших инсульт.

**Ключевые слова:** инсульт, реабилитация, тренажер, упражнения.

На данный момент существует множество различных методик по восстановлению способностей человека, перенесшего инсульт. К примеру, механотерапия, электростимуляция и другие методы, предназначенные для амбулаторных условий, лекарственные методы, которые увеличивают эффект проводимых параллельно мероприятий по реабилитации.

Для условий вне стационара актуальным направлением современной медицины является развитие телемедицинских технологий. В связи с этим появились новые методы лечения: тренировки в виртуальной реальности, тренировки движения кисти методом нейропроб с помощью алгоритмов компьютерного зрения и т.д.

Все эти средства дороги и высокотехнологичны, поэтому некоторым пациентам необходимы обучающие программы по использованию компьютерных методик. Из этого следует вывод, что устройство должно быть простым в использовании и иметь человекоориентированный интерфейс.

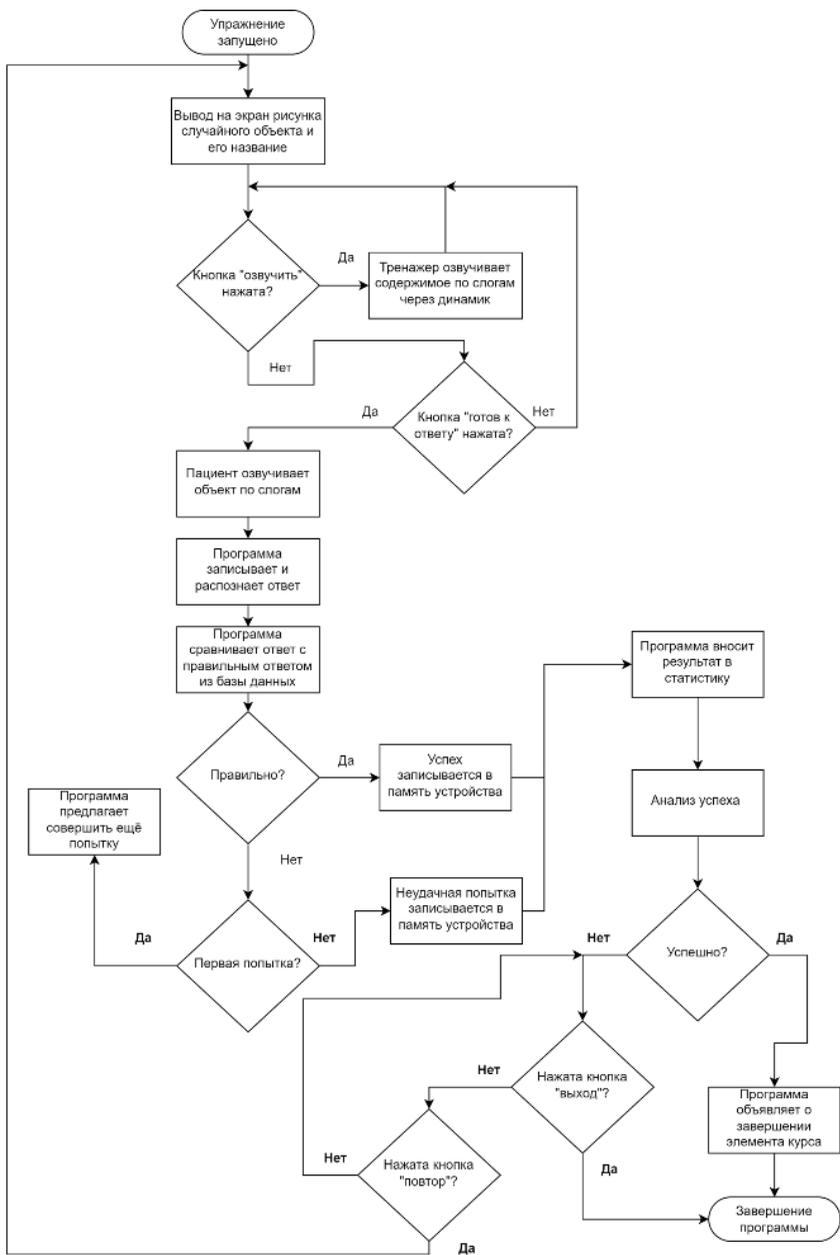


Рис. 1. Блок-схема работы программы-упражнения

В противном случае для пациентов потребуется организовывать обучающие занятия, что довольно трудно как для самих больных, так и для специалистов.

В восстановлении когнитивных способностей хорошо себя зарекомендовали простые упражнения на запоминание последовательностей, составление слов и т.д., которые были отобраны для тренажера в работе [1].

Для самостоятельного восстановления пациента достаточно устройства с простым набором упражнений, которые могут позволить влиять как на когнитивные и речевые, так и на моторные способности с минимальным участием специалистов. Упражнения не созданы под программу, но, модернизировав их, возможно получить полнофункциональный тренажер утраченных после инсульта способностей. Функциональные решения для реализации комплекса заложены в домашнем тренажере когнитивных и речевых способностей, однако для реализации также необходимо адаптировать алгоритмы упражнений для тренажера, которые будут встроены в программное обеспечение устройства [2].

Программа работы тренажера представляет собой совокупность упражнений, которые пациент должен выполнить, проходя реабилитацию. Алгоритм работы программы на основе решений, принимаемых пациентом, представлен на рис. 1.

Критерием оценки выполнения упражнения является правильное произношение написанного слова по слогам, что проверяется с помощью операции сравнения ответа пациента с ответом из базы данных. После результаты сохраняются в памяти устройства для отслеживания прогресса реабилитации.

Таким образом, с помощью разработанного алгоритма возможно спроектировать удобный тренажер, подходящий потребностям пациентов для восстановления способностей в домашних условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долматова С.С. Определение базового функционала домашнего тренажера для постинсультных больных / С.С. Долматова, А.М. Кишкина // Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения. – 2021. – Томск: ТУСУР, 2021. – С. 124–128.
2. Крившенко В.В. Конструктивные особенности тренажера для реабилитации постинсультных больных в домашних условиях / В.В. Крившенко, Ю.Ф. Савчук // Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения. – 2021. – Томск: ТУСУР, 2021. – С. 137–140.

## ***ПОДСЕКЦИЯ 2.2***

### **РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ**

*Председатель – Лоцилов А.Г., проректор по научной работе  
и инновациям ТУСУРа, зав. каф. КУДР, к.т.н.;*  
*зам. председателя – Бомбизов А.А., начальник СКБ «Смена», к.т.н.*

УДК 621.357.9

### **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ МЕДИ**

*Э.Р. Рагимов, студент; С.А. Артищев, доцент каф. КУДР, к.т.н.;*  
*С.С. Петров, студент*  
*г. Томск, ТУСУР, каф. КУДР, Ragimov\_30@mail.ru*

Представлены описание процесса гальванической металлизации пластиковых изделий и результаты. Приведены требования к устройству для автоматического гальванического осаждения меди.

**Ключевые слова:** гальваническая ванна, гальваностегия, металлизация, меднение.

Современная динамика развития промышленности требует таких технологий производства, чтобы сократить временные и экономические затраты для получения желаемого результата. В результате динамичного внедрения аддитивных технологий на смену традиционным металлическим изделиям приходят металлизированные пластиковые. Изготовление деталей из различных материалов (пластик, резина, композиты или фотополимеры) достигается посредством многочисленных методов 3D-печати. Существующие детали, выполненные прежде по традиционной технологии, можно заменить деталями из пластика с их последующей химической металлизацией [1].

Процесс гальванизации представляет собой электрохимическое покрытие детали медью, в котором участвуют обрабатываемая деталь, электролит, электроды и электрический ток. В результате прохождения через электролит электрического тока выделяются молекулы металла, оседающие на поверхности обрабатываемого изделия и образующие на нем тонкую пленку [2]. Преимущества гальванических покрытий заключаются в том, что для них характерна равномерная

толщина и высокий уровень плотности покрытия. Гальванические покрытия подходят в том числе и для обработки деталей, отличающихся сложными формами. В результате гальванизации детали слой металла формируется не только на поверхности, но и проникает в ее объем.

Металлизацию пластика с помощью гальванического способа проводят в достаточно плотных электролитических растворах. На рис. 1 представлена функциональная схема установки для химического осаждения [3]. В ней размещены медные пластины, необходимые для процесса гальванизации. Также предусмотрено место для крепления обрабатываемого изделия, которое подвержено металлизации.

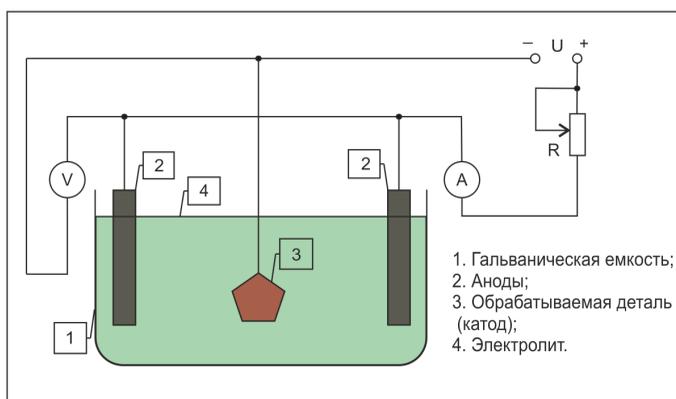


Рис. 1. Функциональная схема для осаждения

Процесс гальванизации пластикового изделия происходит следующим образом. На медные пластины подключается плюсовая клемма (анод) от вторичного источника питания, а минусовая клемма (катод) подключается непосредственно к изделию. В ванну заливается электролитический раствор, содержащий одну или несколько растворенных солей металлов, что увеличивает прохождение электрического тока и способствует образованию ионов. В электролит помещается объект для проведения металлизации и запускается процесс.

Металлизация пластика при помощи меди выполняется в несколько этапов. В первую очередь необходимо отполировать и обезжирить поверхность. Затем проводится сенсibilизация – процесс формирования на пластике пленки из гидроксида олова. Для активации поверхности изделие на 3–4 мин помещается в раствор азотно-кислого серебра. После активации изделие на 60 мин погружается в электролит для металлизации, температура которого должна состав-

лить 18–25° [4]. Пример металлизированной антенны, распечатанной посредством 3D-принтера, представлен на рис. 2 [5].



Рис. 2. Металлизация пластиковой детали (антенны)

В течение всего процесса гальванизации желательно перемешивание электролита. Также необходимо поддерживать температуру электролита в заданном диапазоне. Помимо этого, существует потребность в регулировке значений тока и напряжения. Это вызвано тем, что в процессе металлизации исходное сопротивление объекта изменяется, а следовательно, необходимо изменять и параметры токов и напряжений для получения качественного равномерного осаждения металла. На основе представленных требований была поставлена задача по разработке автоматизированной гальванической ванны.

При гальваническом осаждении меди в ручном режиме существует проблема неравномерного протекания тока, следовательно, возникают дефекты на поверхности детали. Поэтому необходима автоматизация данного процесса для получения качественного слоя меди. На сегодняшний день на рынке отсутствуют портативные аналоги подобных устройств – исключительно промышленные линии для гальванизации. На рис. 3 представлена концепция разрабатываемого макета устройства для проведения гальванического осаждения меди.

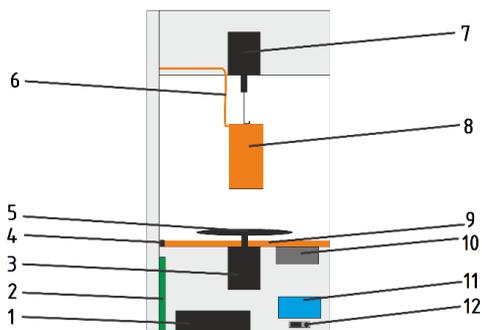


Рис. 3. Концепция разрабатываемого макета устройства

Регулировка значения тока выполняется посредством источника питания (1). За автоматизацию процесса гальванического осаждения меди отвечает блок управления (2), который имеет индикацию (11) и интерфейсы для подключения к компьютеру (12). Данные о температуре электролита считываются терморезистором (4), а стабилизация температуры достигается с помощью термостата (10). Непосредственно к металлируемой детали (8) подводится первый электрод (6), а в нижней части устройства размещен второй электрод (9). Перемешивание электролита обеспечивается шаговым двигателем (3) с лопастями (5), закрепленным в основании. В верхней крышке размещен шаговый двигатель (7) для вращения детали.

В дальнейшем на основании составленной концепции планируется разработать и изготовить устройство для гальванического осаждения меди, позволяющее в значительной степени автоматизировать данный процесс.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рагимов Э.Р. Обзор функциональных возможностей современных 3D-сканеров / Э.Р. Рагимов, С.А. Артищев // XVII Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2021. – С. 122–124
2. Гальваника и гальваническое покрытие: оборудование, виды, назначение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ectrl.ru/osveshchenie/galvanicheskoe-processy.html> (дата обращения: 07.03.2022).
3. Гальваника своими руками в домашних условиях: технология и оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://critech.ru/materialah/galvanicheskoe-zheleznenie.html> (дата обращения: 09.03.2022).
4. Химическое покрытие пластика металлами [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://egorich64.ru/materialy/mednenie-plastika-v-domashnih-usloviyah.html> (дата обращения: 09.03.2022).
5. Ivanchikova E.A. Microwave Carbon Elements / E.A. Ivanchikova, A.G. Loschilov, I.A. Ekimova, N.S. Trufanova, V.N. Fedorov and A.S. Trufanova // 2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Tomsk, Russia. – 2020. – P. 1349–1353.

УДК 528.593

#### **ТРЕХОСЕВОЙ КООРДИНАТОГРАФ ДЛЯ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

*Э.Р. Рагимов, студент каф. КУДР; С.А. Артищев, доцент  
каф. КУДР, к.т.н.; Р.М. Гадиров, с.н.с. СКБ «Смена», к.х.н.  
г. Томск, TVCYP, Ragimov\_30@mail.ru*

Представлены результаты проектирования и сборки трехосевого координатографа. Приведены результаты измерений точности пере-

мещений. Представлен процесс исследования возможностей дозирования посредством пьезоэлектрической головки GeSiM Nano-Tip.

**Ключевые слова:** координатограф, система позиционирования, система перемещения.

В задаче автоматизации технологических процессов широко применяются различные системы перемещения и позиционирования. Такие системы включают в себя высокоточные компоненты механизмов и машин, позволяющие их узлам осуществлять прямолинейные перемещения. Системы линейных перемещений применяются практически во всех отраслях промышленности, таких как машиностроение, автостроение, медицинская техника, электроника, полиграфия и т.д. [1].

В работе рассматривается задача обеспечения точного перемещения устройства прецизионного дозирования технологической жидкости на поверхность подложки.

Для этого была разработана модель координатографа в системе автоматизированного проектирования (САПР) и изготовлен его макет. В конструкции координатографа использованы направляющие на основе шарико-винтовой передачи, поскольку данный вид передачи отличается точностью перемещения, минимальной инерцией и высоким сроком службы. Несущая конструкция координатографа выполнена из алюминиевого профиля 40×80 мм. Соединение отдельных секций профиля между собой реализовано посредством универсальных крепежных элементов. Для осуществления точного перемещения функциональной головки по координатам выбраны линейные направляющие FUYU FSL-6, которые характеризуются высокой точностью и надежностью. Шаговые двигатели Nema 23 приводятся в движение с помощью внешних драйверов DM556. Фиксирование текущих координат для анализа точности позиционирования дозирующей головки осуществляется посредством оптических линеек и дисплея, на котором отображаются координаты по осям X и Y. Для закрепления направляющих и оптических линеек разработаны кронштейны. На рис. 1 представлены трехмерная модель в САПР и макет координатографа в сборе.

В качестве основного блока управления координатографом использована плата управления 3D-принтерами Smoothieboard MKS Sbase v1.3 с подключением с помощью Ethernet [2].

После окончательной сборки были проведены испытания системы трехкоординатного позиционирования: проверка перемещений по осям, срабатывание концевых выключателей, наличие связи с компьютером, работа оптических линеек.

Измерение точности позиционирования проведено посредством оптических линеек, закрепленных на координатографе. Минимально возможное перемещение составляет 1 мкм. Для измерения макси-

мального отклонения перемещения была разработана методика испытаний, основанная на десятикратном повторении перемещений на заданное расстояние (1, 10 и 100 мм). Из выполненных измерений установлено, что максимальная погрешность перемещений по осям  $X$  и  $Y$  составляет порядка 130 мкм на расстоянии 200 мм и более.

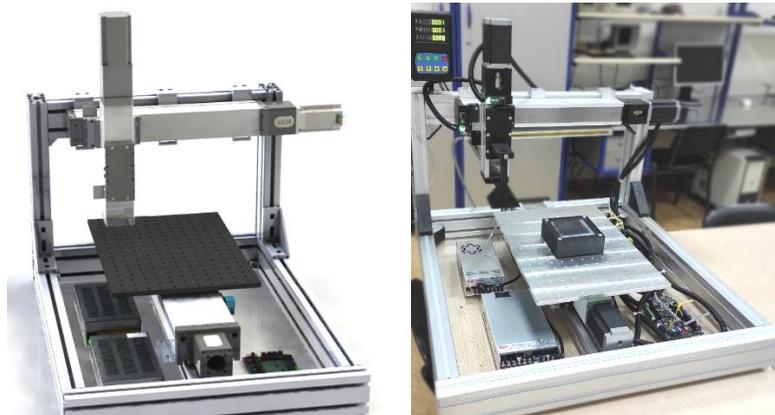


Рис. 1. Трехмерная модель и макет координатографа

Измерения повторяемости выполнены при помощи микроскопической камеры DigiScore, закрепленной на кронштейне оси  $Z$ . Перед началом работы в программном обеспечении камеры выполняется калибровка по микролинейке. После этого выполнялись перемещения на расстояния 1, 10 и 100 мм по осям  $X$  и  $Y$  и возврат головки в начальные координаты.

Из результатов измерений погрешности перемещений и повторяемости было установлено, что возврат к начальным координатам после перемещений на расстояния 1–100 мм осуществляется стабильно с хорошей повторяемостью не хуже 5 мкм. Это говорит о том, что ошибки перемещения в обе стороны компенсируют друг друга. Проведенные испытания показали, что полученной точности позиционирования координатографа достаточно для отработки системы дозирования материалов.

С помощью разработанного макета координатографа изготовлен топологический рисунок (массив) капель на стеклянной подложке, полученный посредством дозирующей головки GeSiM Nanotip-J A 070-401, который представлен на рис. 2.

Из рис. 2 можно заметить, что координатограф обеспечивает перемещение дозатора на заданное расстояние 500 мкм. Измеренная

микроскопом погрешность перемещения дозатора между соседними каплями составляет не более 50 мкм.

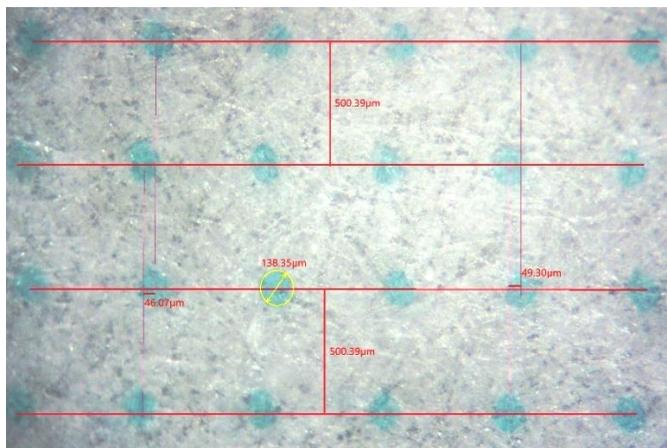


Рис. 2. Массив капель, полученный посредством головки GeSiM Nanotip

Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» ТУСУРа.

Результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2021-1059 от 29.09.21.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Системы линейного перемещения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bearing-service.ru/production/sistemy-lineinogo-peremescheniya/> (дата обращения: 05.03.2022).

2. Рагимов Э.Р. 3D-принтер для изготовления многослойных печатных плат / Э.Р. Рагимов, С.А. Артищев // XVI Междунар. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2020. – С. 139–42.

УДК 551.5

#### ДОМАШНЯЯ МЕТЕОСТАНЦИЯ

*О.А. Афанасьев, А.Е. Левшин, В.Т. Никитина,*

*А.А. Трофимова, студенты*

*г. Томск, НИ ТПУ, vt1@tpu.ru*

Представлена разработка домашней метеостанции, которая позволяет измерять температуру, давление и количество углекислого газа, превышение нормы которого отображается индикатором, а так-

же позволяет выводить данные на дисплей как в численном формате, так и в графическом.

**Ключевые слова:** домашняя метеостанция, температура, давление, количество углекислого газа.

Цель работы – собрать домашнюю метеостанцию с измерением температуры, давления и количества CO<sub>2</sub>, с выводом показаний на дисплей.

В процессе работы проводились проверки влияния различных датчиков на работу устройства.

Функциями данной метеостанции являются измерение температуры, атмосферного давления, концентрации углекислого газа, вывод их показаний на дисплей и построение графиков данных величин за определённый интервал времени.

После выбора и приобретения необходимых компонентов и расходных материалов была произведена сборка электронной части устройства по схеме, изображенной на рис. 1.

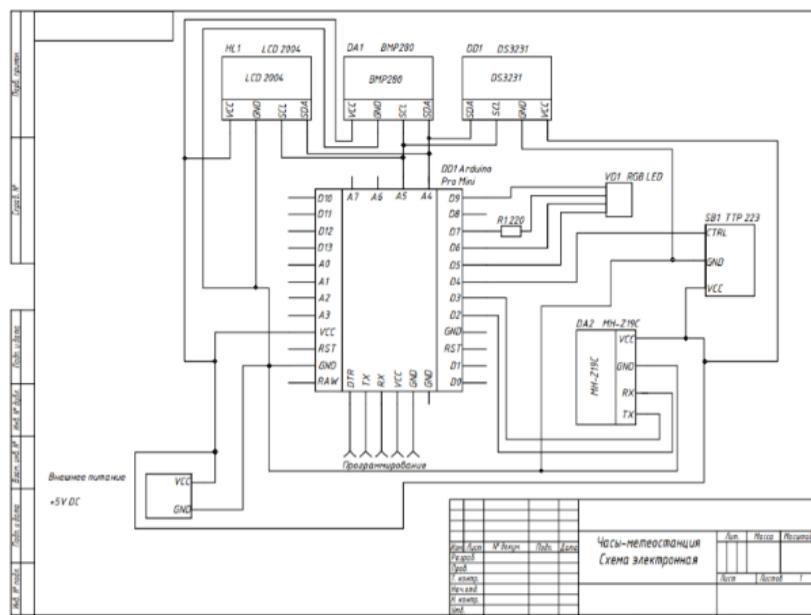


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная

По изменению давления за час будут прогнозироваться осадки. Резкое падение или повышение давления предвещает дождь. Изменение давления от +50 до -50 Па означает, что погода меняться не бу-

дет. Если изменение давления около  $-150$  относительно предыдущего измеренного значения, следовательно, будет ухудшение погоды (надвигается циклон), если  $+150$ , то надвигается антициклон (это означает, что погода будет хорошая). Если изменение меньше  $-200$ , то будет гроза/буря/шторм. При готовности датчиков к работе считываются показания с датчиков и строятся графики. После проверки концентрации углекислого газа в соответствии с ГОСТом 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» о допустимых значениях содержания  $\text{CO}_2$  светодиод загорается зеленым при значениях от 400 до 800 ppm, при значениях от 800 до 1200 ppm горит синим цветом, при значениях больше 1200 ppm мигает красным цветом. При нормальных условиях пределы измерения  $\text{CO}_2$ : нормальный уровень в атмосфере, на свежем воздухе в 400 ppm; допустимый в комнате от 400 до 800 ppm. В диапазоне от 800 до 1200 ppm люди испытывают усталость. При превышении этих норм возникает головокружение, полная потеря работоспособности. На главный экран устройства выводятся время, дата и день недели, показания датчика температуры, датчика  $\text{CO}_2$ , датчика давления и вероятность выпадения дождя. Для просмотра каждого из графиков необходимо переключение с помощью сенсорной кнопки. Вид готового устройства приведен на рис. 2.



Рис. 2. Вид готового устройства

В данной работе была собрана домашняя метеостанция, которая позволяет измерять температуру, давление и концентрацию углекислого газа в воздухе, превышение нормы которого отображается с помощью индикатора. При выполнении проекта были выбраны элементы устройства, разработан алгоритм и код программы. Проведенное тестирование устройства позволило обнаружить недостатки и ошибки и устранить их.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Уроки Ардуино: учеб. для начинающих [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arduino-master.ru/uroki-arduino/arduino-uroki-nachaloboty/>, свободный (дата обращения: 30.09.2021).

2. Допустимая концентрация углекислого газа в помещении [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://clck.ru/eSGPA>, свободный (дата обращения: 30.09.2021).

УДК 655.326

### АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ЭКСТРАКЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПАСТ ДЛЯ ПРИНТЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

*Н.С. Труфанова, аспирант каф. КУДР*

*Научный руководитель С.А. Артищев, доцент каф. КУДР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, [trufanovan1997@gmail.com](mailto:trufanovan1997@gmail.com)*

Рассматривается апробация методики экстракции параметров проводящих паст для принтерной технологии изготовления СВЧ-устройств. Применение параметров, полученных при экстракции, может повысить точность моделирования при использовании реальных электрических свойств материала.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, принтерная печать, экстракция, электрические характеристики.

Изготовление СВЧ-устройств методом принтерной печати находится на стадии научных исследований. Технология печати позволяет наносить функциональный материал при минимальном контакте сопла с подложкой.

Ограничения выбора номенклатуры паст для принтерной технологии приводят к необходимости модификации паст путем разбавления растворителем (при высокой вязкости) [1]. При измерении напечатанных компонентов было обнаружено отклонение электрических параметров от расчетных [2]. Предположительно это может быть связано с разбавлением паст, так и с расхождением параметров от заявленных в технических условиях. Это, в свою очередь, накладывает определенные трудности при проектировании компонентов и узлов СВЧ-техники. Одним из решений данной проблемы является определение электрических параметров паст экспериментальным путем.

Целью применения экстракции параметров паст является выявление параметров, влияющих на потери сигнала. Экстракция основана на итерационном изготовлении и выявлении электрических параметров по расчетно-экспериментальному методу. Применение парамет-

ров, полученных при экстракции, может повысить точность построения моделей.

В работе [3] приведена методика экстракции параметров паст для принтерной технологии. В результате применения методики экстракции для микрополосковой линии с волновым сопротивлением 50 Ом были выявлены следующие электрические параметры: потери 7 дБ при частоте 1 ГГц, эффективная диэлектрическая проницаемость 6,7.

Целью работы является моделирование и изготовление полосно-пропускающего фильтра с применением параметров, полученных при экстракции микрополосковой линии.

Полосовые фильтры являются наиболее распространенными фильтрами СВЧ-диапазона. Они предназначены для ограничения частотного диапазона. Полосовые фильтры представляют собой систему взаимодействующих резонаторов, каждый из которых, в свою очередь, представляет собой отрезок полосковой или микрополосковой линии [4]. Наибольшее применение нашли открытые (неэкранированные) микрополосковые резонаторы.

В задаче моделирования использовалась среда AWR Design Environment 14. В утилите iFilter был рассчитан шпилечный полосно-пропускающий фильтр. В диалоговом окне Design Options были заданы параметры подложки, минимальная ширина проводников и затухание в линии передачи. В Design Utilities были заданы возвратные потери. В результате генерации была построена топология шпилечно-го фильтра, показанная на рис. 1.

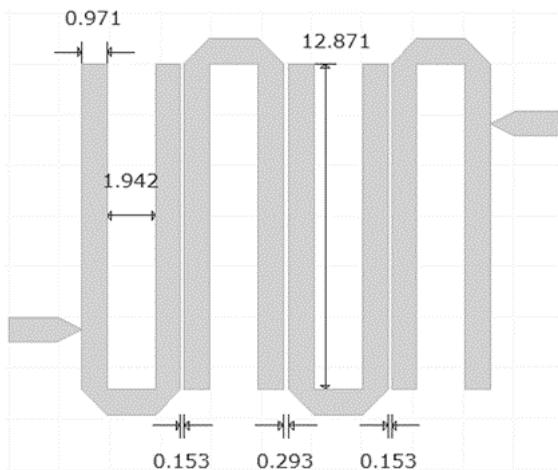


Рис. 1. Топология шпилечного фильтра

Цифровая модель фильтра строилась с учетом влияния растекания паст. Для печати полосно-пропускающего фильтра использовались полимерная серебросодержащая паста ПСП-2 [5] и сопло с внутренним диаметром 100 мкм. Геометрические размеры напечатанного фильтра показаны на рис. 2.

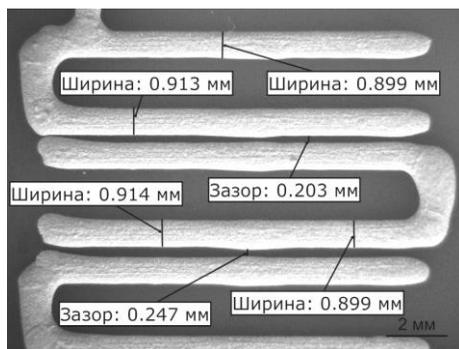


Рис. 2. Геометрические размеры фильтра

После проведения измерений  $S$ -параметров полученные частотные зависимости были импортированы в AWR. На рис. 3 и 4 приведены сравнения частотных зависимостей модели и измерения.

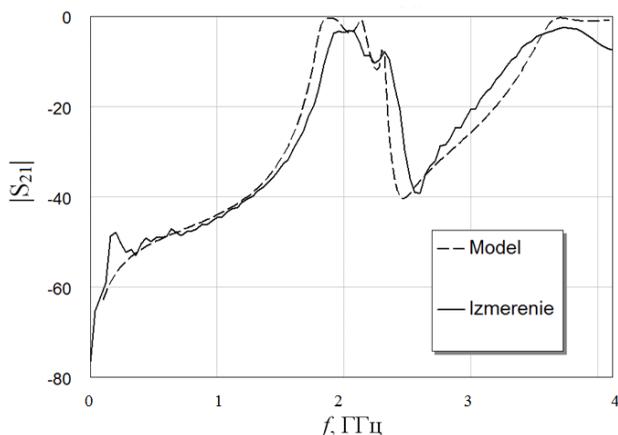


Рис. 3. Сравнение частотных зависимостей модуля коэффициента передачи сигнала

На графике сравнений частотной зависимости модуля коэффициента передачи наблюдается незначительное отклонение измеренных значений от расчетных порядка 0,1 ГГц.

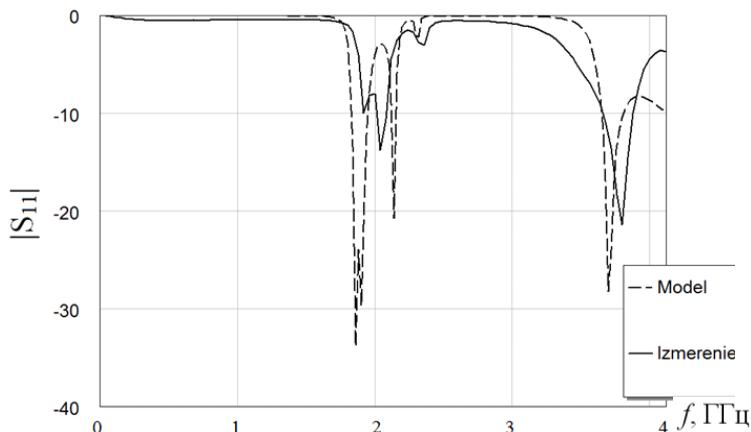


Рис. 4. Сравнение частотных зависимостей модуля коэффициента отражения сигнала

На графике частотных зависимостей модуля коэффициента отражения видно, что резонансы модели составляют порядка  $-30$  дБ. У напечатанного фильтра такие резонансы отсутствуют.

Применение методики экстракции параметров микрополосковой линии, напечатанной пастой ПСП-2, позволило более точно изготовить шпилечный полосно-пропускающий фильтр на центральной частоте 2 ГГц. В результате потери фильтра составляют  $-3,4$  дБ на центральной частоте 2 ГГц.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Труфанова А.С., Труфанова Н.С. Определение пропускной способности поршневого дозатора проводящих паст // Сборник избр. статей по матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020». – Томск: В-Спектр, 2020. – Ч. 1. – С. 157–160.
2. Труфанова Н.С., Труфанова А.С. Исследование возможности изготовления планарных компонентов методом принтерной печати // Сборник избранных статей по материалам международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020». – Томск: В-Спектр, 2021. – Ч. 1. – С. 162–164.
3. Труфанова Н.С., Артищев С.А. Методика экстракции электрических частотных параметров проводящих чернил // Сборник науч. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. «САПР и моделирование в современной электронике». – Брянск, 2021. – С. 54–58.
4. Сержантов А.М. Резонансные полосковые структуры и частотно-селективные устройства на их основе с улучшенными характеристиками: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.03. – Красноярск, 2015. – С. 12–13.
5. ТУ 6365-007-59839838–2004. Пасты полимерные. – М.: ООО «НПП ДЕЛЬТА-ПАСТЫ», 1993. – 17 с.

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВОЛНОВОДА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

*Н.С. Труфанова, аспирант каф. КУДР;*

*С.А. Айрих, А.Т. Игнатьева, О.В. Кустов, студенты*

*Научный руководитель С.А. Артищев, доцент каф. КУДР, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, trufanovan1997@gmail.com*

Приводятся исследования возможности металлизации пластиковых СВЧ-устройств. Приведены результаты измерения частотных зависимостей двух напечатанных и металлизированных волноводов.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, 3D-печать, волновод, металлизация, частотные характеристики.

В настоящее время технология аддитивной 3D-печати находит широкое применение для проектирования и прототипирования в различных отраслях науки и производства. Актуальным вопросом являются оценка и проработка возможностей технологии 3D-печати применительно к изготовлению СВЧ-устройств. Поскольку полимеры, используемые в 3D-печати, являются диэлектриками, для ограничения распространения электромагнитной волны во всех направлениях требуется создание проводящего слоя на поверхности распечатанных моделей.

Критически важным условием при металлизации пластикового изделия является максимально гладкая поверхность [1]. Различные неровности и излишняя слоистость будут усилены в процессе металлизации, вследствие чего произойдет искажение параметров СВЧ-устройства [2]. При использовании гальваники металлическое покрытие наносится очень тонким слоем, поэтому допуски на конечное изделие соблюдаются. Сложность металлизации заключается в получении металлического слоя во внутренней части изделия.

Целью работы является исследование возможности металлизации пластиковых СВЧ-устройств. Для проведения металлизации пластика был выбран волновод. Частотная зависимость модуля коэффициента передачи идеального металлического волновода находится в диапазоне от 0 до  $-1$  дБ, а частотная зависимость модуля коэффициента отражения – порядка  $-150$  дБ.

Волновод, рассчитанный на диапазон частот 8–12 ГГц, был напечатан из пластика типа PLA. Геометрические размеры образца составляют  $200 \times 20$  мм.

Для металлизации напечатанного устройства был выбран метод гальванического наращивания. Первым этапом было нанесение про-

водящего подслоя на поверхность устройства для повышения адгезии и равномерности осаждения металла, а также для получения начальной проводимости. Далее гальванически в течение 15 ч покрывалось медью при средней плотности тока  $0,5 \text{ А/дм}^2$ . Полученная толщина слоя металлизации с учетом подслоя составила  $40 \text{ мкм}$ . Металлизированный волновод представлен на рис. 1.

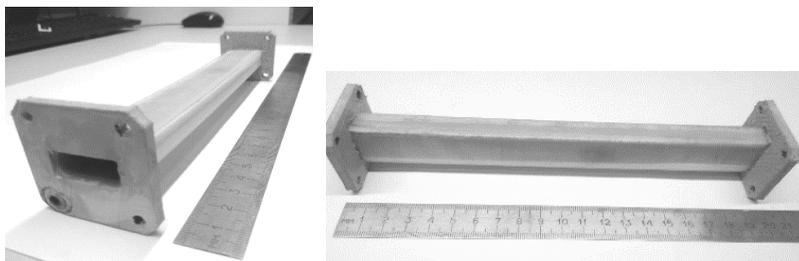


Рис. 1. Металлизированный волновод

Измеренные частотные характеристики волновода представлены на рис. 2.

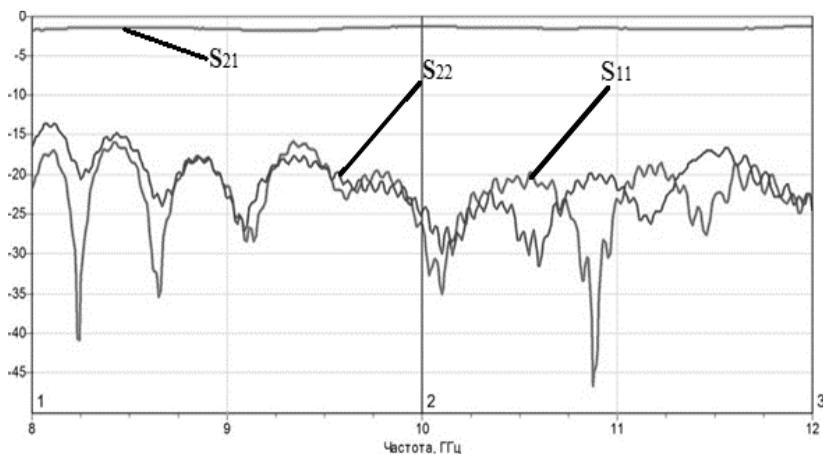


Рис. 2. Частотные характеристики волновода:  $S_{11}$  – коэффициент отражения по входу;  $S_{22}$  – коэффициент отражения по выходу;  $S_{21}$  – коэффициент передачи

Поскольку нанесение подслоя и контроль равномерности покрытия на внутренней части напечатанного волновода технологически сложно проводить, было принято решение сделать волновод из двух деталей. Конструкция составного волновода представлена на рис. 3.

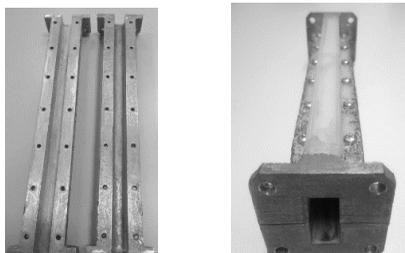


Рис. 3. Составной волновод

На рис. 4 представлены измеренные коэффициенты передачи цельного и составного волноводов.

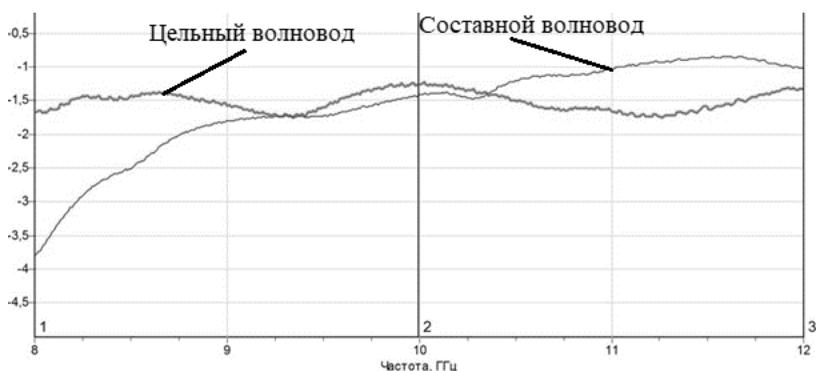


Рис. 4. Сравнение коэффициента передачи напечатанных волноводов

По результатам измерения можно сделать вывод, что коэффициент передачи цельного волновода равномерно колеблется в диапазоне от  $-1$  до  $-2$  дБ. Коэффициент передачи составного волновода колеблется от  $-0,5$  до  $-4$  дБ. Наблюдаются высокие потери составного волновода на нижних частотах, что, возможно, связано с изменением геометрии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванчикова Е.А. Отработка технологии полировки пластиковых изделий, изготовленных методом FDM-печати / Е.А. Иванчикова, А.С. Труфанова, Н.С. Труфанова // Сб. избр. статей по матер. междунар. науч.-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2020». – Томск: В-Спектр, 2020. – Ч. 1. – С. 133–135.

2. Рагимов Э.Р. Измерение твёрдости изделий, изготовленных методом 3D-печати // Сб. избр. статей по матер. междунар. науч.-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2021». – Томск: В-Спектр, 2021. – Ч. 1. – С. 152–156.

**ШИРОКОПОЛОСНЫЙ SPDT-ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ  
НА ПОДЛОЖКЕ GaAs В QFN-КОРПУСЕ**

*Д.А. Петровых, студент каф. ОЭИ, НИ ТПУ;*

*В.Е. Михайленко, В.А. Чижков, студенты каф. СВЧМКР, ТУСУР;*

*В.А. Исхаков, студент каф. РЭ, ТГУ;*

*А.Д. Леонтьев, инженер АО «НПФ «Микран»;*

*Д.С. Данилов, рук. группы МИС АО «НПФ «Микран»*

*Научный руководитель А.С. Загородний, доцент каф. СВЧМКР, к.т.н.  
г. Томск, dima\_petrovych@mail.ru*

Выполнены измерения основных параметров монолитной интегральной схемы (МИС) сверхширокополосного коммутатора MP229 в корпусе QFN. Приведено сравнение измеренных характеристик корпусной и бескорпусной МИС, сделаны выводы о целесообразности применения корпусирования на основании полученных данных.

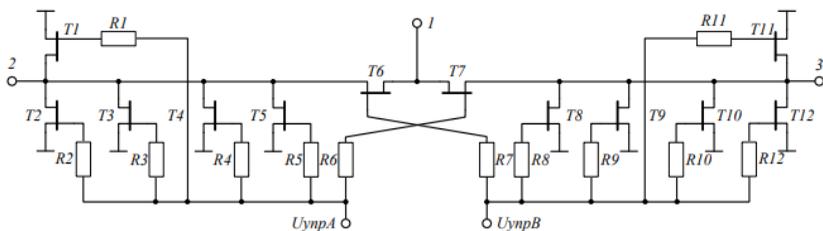
**Ключевые слова:** МИС, корпус, переключатель, GaAs.

Монолитные интегральные схемы СВЧ-диапазона, как правило, производятся в двух вариациях: бескорпусные кристаллы и кристаллы в корпусах для поверхностного монтажа [1]. Среди преимуществ бескорпусных МИС можно выделить меньшие габаритные размеры и величину паразитных параметров в сравнении с корпусированными. Однако для функционирования бескорпусных МИС требуются условия чистого пространства, а установка их на плату чревата крайней зависимостью конечного изделия от температуры, пыли, влаги и прочих внешних воздействующих факторов [2]. В связи с этим в СВЧ-электронике бескорпусные МИС зачастую включают в составе модулей с общей герметизацией. Использование МИС в корпусах решает эту проблему: их возможно монтировать на печатную плату без опасений напрямую воздействовать на кристалл и повредить его [3].

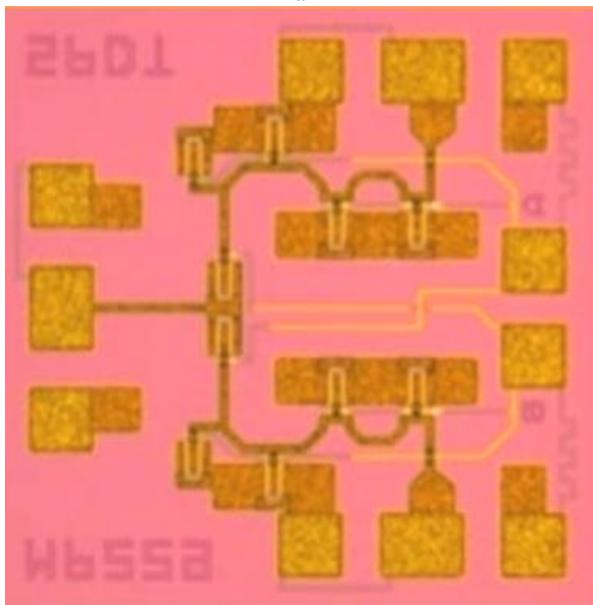
Целью работы является экспериментальное исследование характеристик транзисторного переключателя MP229 производства АО «НПФ «Микран». Представлены результаты измерений кристалла на пластине и интегральной схемы в корпусе. В качестве корпуса был применён керамический QFN-корпус размером 3×3 мм производства АО «НИИПП».

СВЧ-переключатели являются частью устройств, решающих коммутационные и логические задачи, включая импульсные модуляторы, устройства защиты и прочие изделия.

Объектом исследования является MP229 – арсенид-галлиевая МИС сверхширокополосного (диапазон рабочих частот DC...40 ГГц) SPDT-переключателя на основе рНЕМТ-транзисторов [4].



a



б

Рис. 1. Принципиальная электрическая схема (a) и микрофотография (б) MR229

Принцип работы данного переключателя заключается в коммутации между двумя каналами путём подачи отрицательного управляющего напряжения на соответствующие выводы ( $U_{упрА}$ ,  $U_{упрБ}$ ). При подаче на управляющий вывод А напряжения  $U_{упрА}$ , равного  $-5$  В, транзистор Т7 открывается, тем самым производя коммутацию переключателя в положение 1-2. В то же время транзисторы Т8-Т12 остаются в открытом положении, уменьшая паразитный сигнал, утекающий в закрытый канал 1-3, тем самым увеличивая развязку. Для положения 1-3 коммутация производится аналогичным образом.

В ходе работы было проведено измерение характеристик MR229 с помощью векторного анализатора цепей. Схема экспериментальной

установки и печатная плата для размещения МИС и оснастки для подачи управляющего напряжения представлены на рис. 2.



Рис. 2. Схема экспериментальной установки (а) и печатная плата для измерений характеристик MP229 (б)

Были измерены возвратные потери переключателя (рис. 3), потери на проход (рис. 4), а также развязка, характеризующая степень подавления паразитного прохождения сигнала, приложенного закрытому порту (рис. 5).

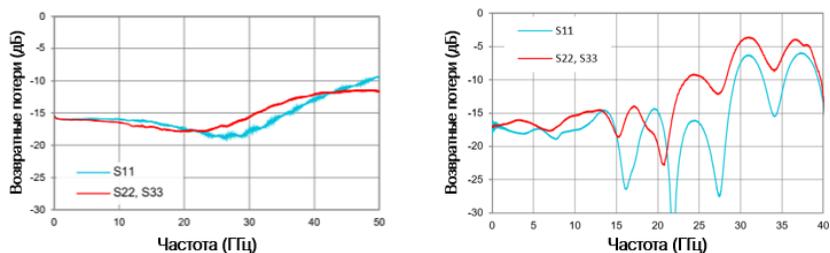


Рис. 3. Возвратные потери MP229 (слева – без корпуса, справа – в корпусе QFN)

Исходя из представленных графиков, видно, что характеристики МИС после корпусирования ухудшились. Ухудшение возвратных потерь связано с переотражениями на дорожках платы и переходах коаксиально-микроразветочных переходов. Полученные значения потерь на проход ограничивают верхнюю границу рабочего диапазона частот до 28 ГГц. Значения изоляции не превышают  $-33$  дБ в диапазоне частот до 33 ГГц, что, несмотря на ухудшение в сравнении с бескорпусной МИС, является отличным показателем для GaAs транзисторных SPDT-переключателей [5]. Следует отметить, что в рамках данной работы не производилось компенсация линии и разъемов, в дальнейших работах этому вопросу будет уделено больше внимания.

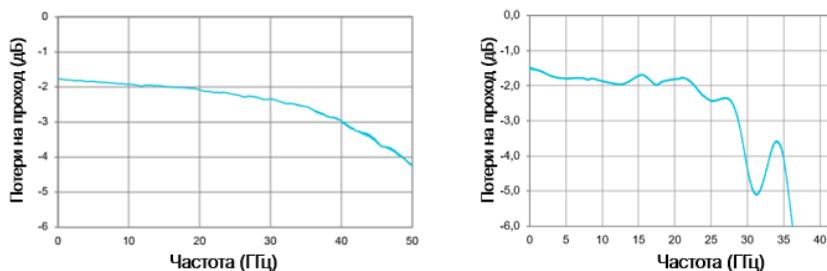


Рис. 4. Потери на проход MP229 (слева – без корпуса, справа – в корпусе QFN)

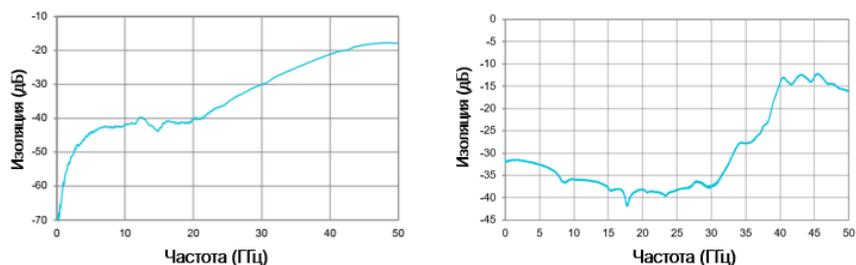


Рис. 5. Изоляция MP229 (слева – без корпуса, справа – в корпусе QFN)

Таким образом, процедура корпусирования позволяет значительно уменьшить влияние внешних факторов на кристалл и монтировать МИС на печатную плату, что приводит к улучшению массогабаритных характеристик конечного изделия. В ходе работы было определено, что МИС переключателя MP229 в корпусе QFN в диапазоне от 0 до 20 ГГц обеспечивает потери не более 2 дБ, до 28 ГГц – не более 3 дБ. Изоляция в диапазоне до 28 ГГц – не менее 30 дБ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Осипов А.М. Сверхвысокочастотные переключатели на арсениде галлия / А.М. Осипов, Е.А. Паневина // Вестник НовГУ. – 2011. – № 65. – С. 28–31.
2. Делвин Л. Корпуса для микросхем на миллиметровых волнах: зачем они нужны и как мы их делаем? / Л. Делвин, С.В. Шихов // СВЧ-электроника. – 2020. – № 3. – С. 32–34.
3. Devlin L. A Guide to SMT Packaging of Microwave ICs / L. Devlin, A. Dearn // ARMMS Conference. – Nov. 2012.
4. SPDT-коммутатор отражающего типа MP229: каталог / АО «НПФ «Микран». – Томск. – 4 с.
5. Кочемасов В. Твердотельные СВЧ-переключатели. – Ч. 1 / В. Кочемасов, А. Кирпиченков // Электроника НТБ. – 2017. – № 10. – С. 92–97.

## **ПОДСЕКЦИЯ 2.3**

### **ФИЗИЧЕСКАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

*Председатель – Троян П.Е., зав. каф. ФЭ, проф., д.т.н.;  
зам. председателя – Смирнов С.В., проф. каф. ФЭ, д.т.н.*

УДК 537.525

#### **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО НАГРЕВА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В КОМПОЗИТНОЙ $ZrO_2-Al_2O_3$ КЕРАМИКЕ**

*А.В. Долгова, студентка каф. ФЭ*

*Научный руководитель А.С. Климов, проф. каф. физики, д.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, [annedolgora@yandex.ru](mailto:annedolgora@yandex.ru)*

Представлено моделирование влияния диаметра сканирования электронного пучка, распределённого по закону Гаусса, на нагрев и распределение температурных полей в композитном керамическом компакте на основе  $Al_2O_3-ZrO_2$ . Показано, что при облучении электронным пучком, распределённым по закону Гаусса, перепад температур по компакт радиусом 5 мм и толщиной 3 мм оказывается меньше при воздействии непосредственно на сам керамический композит.

**Ключевые слова:** тепловые поля, электронно-лучевое облучение, композитные керамические материалы, спекание компактов.

Композитная керамика находит применение в различных областях промышленности, таких как электроника, медицина, химическая, авиационная и космическая промышленность. В настоящее время существуют различные технологии создания композиционной керамики: методы порошковой металлургии, осаждение из паровой фазы, термическое и реакционное спекание, спекание в искровом разряде [1].

Одним из развивающихся методов получения композитной керамики является электронно-лучевое спекание в форвакуумной области давлений [2]. Узкофокусированный электронный пучок позволяет прогревать поверхность керамики до температур спекания за короткое время – не более 30 мин. Однако при таком методе одностороннего нагрева возникает проблема обеспечения однородности распределе-

ния температуры по глубине облучаемого образца. В настоящей работе для решения этой проблемы предложено использование специального режима сканирования электронным пучком поверхности тигля и керамического компакта. Цель работы заключалась в моделировании тепловых полей по объему керамического образца в процессе его электронно-лучевой обработки, а также в выборе режима сканирования для снижения перепада температур по глубине керамики.

Модель исследуемого образца состоит из графитового тигля в виде цилиндра высотой 10 мм и диаметром 30 мм (рис. 1). Спекаемый образец расположен в углублении в центральной части тигля. Образец из  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  керамики диаметром 10 мм и толщиной 3 мм. Под композитом в тигле находится отверстие для установки термопары диаметром 5 мм.

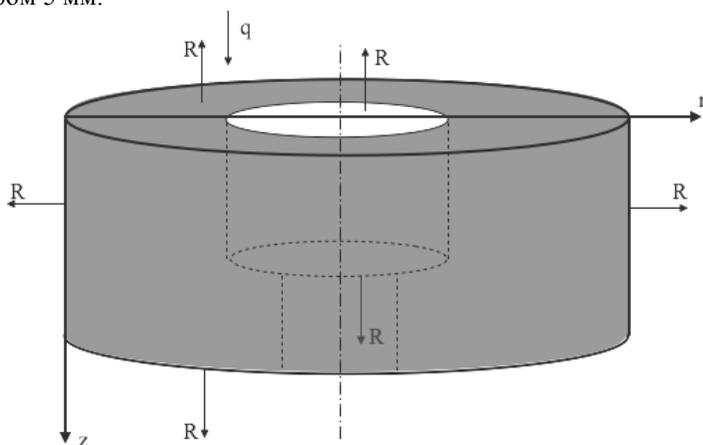


Рис. 1. Модель исследуемого образца

Перенос тепла описывается двумерным уравнением Фурье–Кирхгофа. Теплофизические параметры керамики рассчитывались с учетом их зависимости от температуры.

Теплофизические параметры  $\text{ZrO}_2$  керамики при комнатной температуре: плотность –  $5800 \text{ кг/м}^3$ , теплоемкость –  $549 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ , коэффициент теплопроводности –  $1,8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ; параметры  $\text{Al}_2\text{O}_3$  керамики: плотность –  $3960 \text{ кг/м}^3$ , теплоемкость –  $883 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ , коэффициент теплопроводности –  $20 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  [3].

Уменьшение перепада температур возможно при изменении режима сканирования электронным пучком поверхности тигля и расположенного в нем композита [4]. Если при развертке электронного пучка по кругу направлять его таким образом, чтобы он частично по-

падал на тигель и на композит, то будет возможен нагрев композита за счет теплопроводности от нагреваемого пучком тигля.

На рис. 2 показано распределение температурных полей по радиусу исследуемого образца при облучении пучком тигля, полученное в результате моделирования.

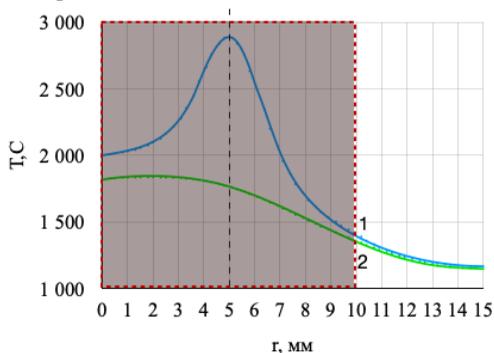


Рис. 2. Температурное поле по радиусу образца при воздействии электронного пучка на тигель: 1 – облучаемая сторона, 2 – необлучаемая сторона

Как видно из рис. 2, несмотря на значительный перепад температуры по глубине тигля, в спекаемом образце перепад значительно ниже и не превышает нескольких десятков градусов. Стоит отметить, что наибольший перепад температур получается в случае воздействия пучка на границу тигель–композит. В этом случае температура по всему объему композита находится в пределах от 1070 до 1400 °С, в середине композита температура может быть недостаточной для спекания, в то время как на границах температура уже составляет 85% от температуры плавления композита.

**Заключение.** При облучении электронным пучком диаметром 5 мм с Гауссовым распределением перепад температур по композиту  $ZrO_2-Al_2O_3$  керамики не превышает нескольких десятков градусов. Температура по всему объему композита находится в пределах от 1200 до 1350 °С, что входит в диапазон, оптимальный для спекания  $Al_2O_3-ZrO_2$  керамики.

Исследование поддержано грантом Президента Российской Федерации для молодых ученых – докторов наук, проект № МД-754.2021.4.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Richerson W. Modern Ceramic Engineering, Properties: Processing and Use in Design. – London: CRC Press, 2020. – 803 p.

2. Burdovitsin V.A., Klimov A.S., Oks E.M. On the possibility of electron-beam processing of dielectrics using a fore-vacuum plasma electron source // Technical physics letters. – Jun. 2009. – Vol. 35, Iss. 6. – P. 511–513.

3. Казанцев Е.И. Промышленные печи: справочное руководство для расчетов и проектирования. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Металлургия, 1975. – С. 123–124, 140.

4. Долгова А.В., Егоров Е.А., Климов А.С. Влияние профиля электронного пучка на спекание керамических компактов из диоксида циркония // «Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения – 2021»: матер. X регион. науч.-практ. конф. – Томск, 2021. – С. 330–333.

УДК 533.9

## **РАЗРЯД В ОТСУТСТВИЕ ЭМИССИОННОЙ СЕТКИ В ФОРВАКУУМНОМ ПЛАЗМЕННОМ ЭЛЕКТРОННОМ ИСТОЧНИКЕ**

*Е.А. Егоров, студент каф. ФЭ*

*Научный руководитель А.С. Климов, проф. каф. физики, д.т.н.  
Проект ГПО 1604. Электронно-лучевая обработка материалов  
в форвакуумной области давлений  
г. Томск, ТУСУР, bobik0040@mail.ru*

Приведены результаты исследования влияния площади эмиссионного окна в аноде и катоде на возможность извлечения электронов из разрядной системы в отсутствие стабилизирующей плазму сетки и при работе источника с перепадом давления в несколько порядков. Показано, что в случае протяженного полого катода и анода с узкой эмиссионной щелью удастся создать перепад давлений в три порядка между электронным источником и вакуумной камерой. Величина извлекаемого в этом случае тока зависит от рода рабочего газа и протяженности катодной полости.

**Ключевые слова:** тлеющий разряд, разрядная система, полый катод, ленточный пучок, эмиссионный ток.

Системы тлеющего разряда с протяженным полым катодом на протяжении достаточно длительного периода времени привлекают внимание исследователей и разработчиков [1], что связано с относительной простотой получения и поддержания данного типа разряда. В системе тлеющего разряда с полым катодом в результате электростатического удержания электронов в катодной полости и их многократной осцилляции обеспечивается эффективная ионизация рабочего газа и генерация плазмы соответственно [2]. Другим важным преимуществом подобных источников электронов является возможность фор-

мирования электронных пучков большого сечения [3]. В случае формирования электронных пучков для использования их в дальнейшем для генерации пучковой плазмы наиболее предпочтительно использование форвакуумных плазменных электронных источников. Такого типа источники хорошо зарекомендовали себя при работе в диапазоне давлений 1–100 Па. Некритичность источников подобного типа к броскам давления и роду рабочего газа делает их применение привлекательным в плазмохимических технологиях. Как правило, реакционный объем, где формируется пучковая плазма, находится при давлениях  $10^{-1}$ – $10^{-3}$  Па. Для обеспечения работоспособности форвакуумного плазменного электронного источника при таких низких давлениях необходимо обеспечить перепад давлений. Цель настоящей работы в исследовании возможности применения форвакуумного плазменного электронного источника для генерации электронного пучка при давлениях  $10^{-1}$  Па.

Для проведения исследований использовалась разрядная система форвакуумного плазменного источника электронного пучка, представленная на рис. 1.

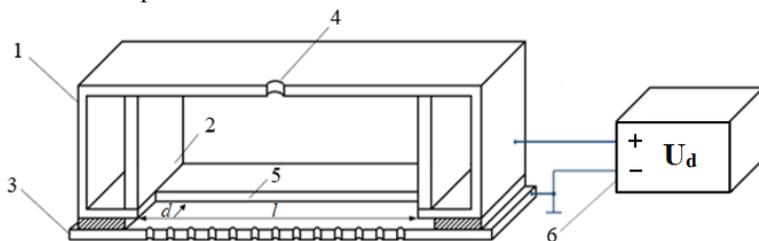


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – протяженный полой катод прямоугольной формы; 2 – вкладыши из меди; 3 – плоский анод; 4 – отверстие в катоде для регулировки давления; 5 – щель в катоде; 6 – высоковольтный источник питания

Внутренние размеры полого катода –  $120 \times 30 \times 45$  мм<sup>3</sup>, ширина катодной щели  $d$  – 2 мм, диаметр отверстий в аноде – 0,8 мм, число отверстий в аноде – 60, расстояние между плоскими частями анода и катода составляло 2,5 мм. Ток разряда регулировался в диапазоне 200–600 мА, ускоряющее напряжение от 1 до 7 кВ на ускоряющий промежуток подавалось от источника питания Spellman SR6. Ток пучка регистрировался на коллекторе, расположенном на расстоянии 15 см от источника. Вакуумная камера откачивалась до давления 0,1 Па, поток газа в полой катод обеспечивал давление в нем порядка 10 Па.

На рис. 2 представлены зависимости тока пучка от ускоряющего напряжения для различных токов разряда. Как видно из рисунка, ве-

личина извлекаемого тока существенно ниже тока разряда, эффективность извлечения не превышает 1%. Сравнение площади катода  $S_k$  с суммарной площадью отверстий в аноде  $S_a$  дает отношение  $S_a/S_k$  порядка 0,15%, что может объяснить такую малую величину извлекаемого тока. Стоит отметить, что увеличение площади и количества эмиссионных отверстий в аноде не дает положительного эффекта, поскольку приводит к снижению перепада давлений между электронным источником объемом вакуумной камеры.

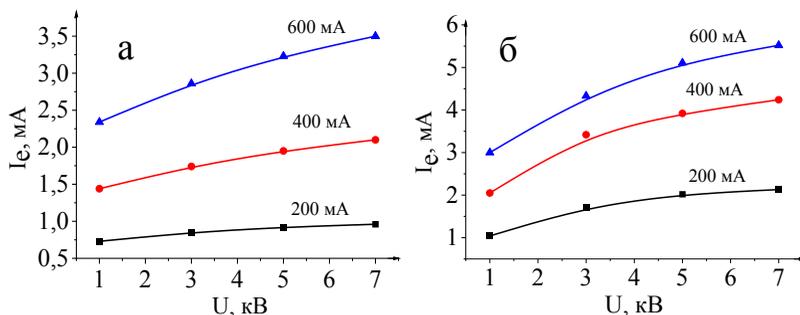


Рис. 2. Зависимость тока пучка от ускоряющего напряжения для различных рабочих газов: а – воздух, б – аргон

Максимальная величина тока пучка составила не более 6 мА в случае работы на аргоне. Кроме того, формируемый электронный пучок обладал низкой однородностью по длине анода. Повышение однородности путем уменьшения площади катода не привело к желаемому эффекту, неоднородность также сохранялась.

**Заключение.** Извлечение электронов из разрядно-эмиссионной системы с протяженным полым катодом позволяет получать электронные пучки с током до 6 мА, давлении в вакуумной камере 0,1 Па и давлении в источнике 10 Па. Повышение тока пучка может быть достигнуто изменением конфигурации разрядно-эмиссионной системы, однако требует отдельных исследований.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ, проект FEWM -2020-0038.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Москалев Б.И. Разряд с полым катодом. – М.: Энергия, 1969. – 184 с.
2. Метель А.С., Григорьев С.Н. Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов. Физика–техника–применение. – М.: ИЦ ГОУ МГТУ «Станкин», 2005. – 294 с.
3. Бурдовицин В.А. Форвакуумные плазменные источники электронов / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник и др. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2014. – С. 103–104.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ  
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОМ СПЕКАНИИ  
АЛЮМОХРОМНОЙ КЕРАМИКИ**

*А.А. Зенин, доцент каф. физики, к.т.н.;*

*Г.Ф. Марчук, студент каф. ЭП*

*г. Томск, ТУСУР, zenin1988@gmail.com*

Представлены результаты исследования теплопроводности спрессованных компактов смеси алюмооксидной керамики и хрома разного процентного состава при электронно-лучевом спекании. Показано, что на градиент температуры при электронно-лучевом спекании оказывает влияние процентный состав исходного спрессованного компакта, а минимальный перепад температур при термостабилизированной выдержке 1400 °С лежит в пределах от 40 до 70 °С.  
**Ключевые слова:** электронно-лучевое спекание, алюмохромная керамика, форвакуум, перепад температур.

Разработка керметов с различными фазовыми составами и типами структур позволяет получать новые композиционные материалы с комплексом свойств, делающим перспективным их применение в различных областях техники [1]. Интерес к кермету  $Al_2O_3-Cr$  вызван тем, что в нем может быть достигнуто сочетание высокой твердости, прочности, огнеупорности, свойственной оксиду алюминия, с прочностью, характерной для хрома. Такой кермет, имея относительно невысокую плотность, может обладать достаточно высокой трещиностойкостью, ударной вязкостью и стойкостью к усталостному разрушению. Поэтому он может быть также перспективен для использования в качестве материала некоторых элементов конструкций высокотемпературной техники, эксплуатируемых в воздушной среде в условиях воздействия термических напряжений [2].

Ранее в работе [3] была продемонстрирована возможность электронно-лучевого спекания смеси алюмооксидной и циркониевой керамики. Целью настоящей работы является исследование возможности электронно-лучевого спекания композитной алюмохромной керамики, а также определение перепада температуры как во время процесса спекания, так и у спеченных образцов.

**Методика эксперимента.** Для электронно-лучевого спекания компактированных образцов из порошков хрома и оксида алюминия использовалась установка ЭЛУ-1, оснащенная плазменным источником электронов. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1, а. В качестве основы для изготовления металлокерамики ис-

пользовались порошки алюмооксидной керамики и хрома с размерами зерен 10 мкм. В матрице пресс-формы цилиндрической формы диаметром 10 мм прессовали образцы толщиной 2,5 мм трех различных процентных составов (75/25, 50/50 и 25/75 соответственно алюмооксидной керамики и хрома).

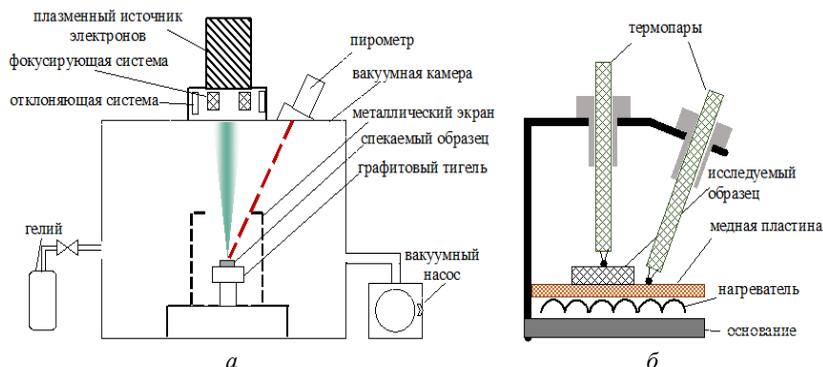


Рис. 1. Схема электронно-лучевого спекания (а) и измерения перепада температуры (б)

Образцы спекались в атмосфере инертного газа – гелия при давлении в вакуумной камере 30 Па. Нагрев образцов до температуры спекания 1400 °С осуществлялся постепенно в течение 30 мин путем увеличения тока электронного пучка при фиксированном ускоряющем напряжении 15 кВ. Контроль температуры в процессе электронно-лучевого спекания осуществлялся бесконтактным методом с помощью высокотемпературного пирометра Raytek Marathon. При достижении температуры спекания производилась выдержка 10 мин с последующим остыванием образцов.

Для измерения перепада температур спеченных образцов использовалась установка (рис. 1, б). Для минимизации влияния тепловой конвекции на измерения установка помещалась в вакуумную камеру, давление в которой поддерживалось на уровне 5–10 Па. В процессе выхода на стационарный тепловой режим фиксировались значения измеряемых термопарами температур. Для исключения наведенного ЭДС вся экспериментальная установка была заземлена.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** Ниже на рис. 2 приведены результаты измерения перепада температур при электронно-лучевом спекании (а) и спеченных образцов (б).

Из приведенных зависимостей видно, что перепад температур спеченных образцов равномерный (рис. 2, б), а перепад температур

при спекании уменьшается при повышении температуры спекания (рис. 2, а), что может быть связано с уплотнением компакта в процессе электронно-лучевого спекания.

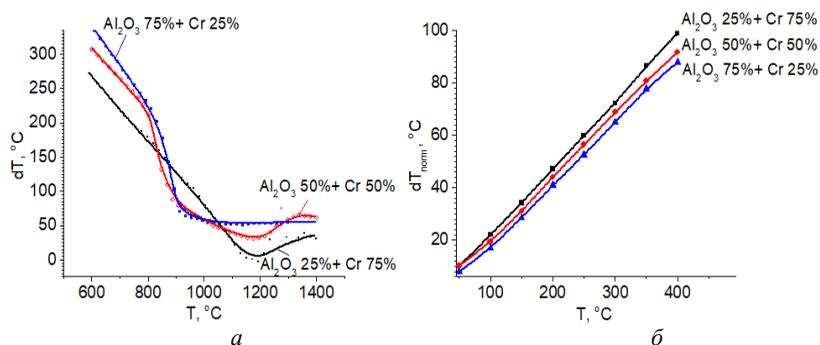


Рис. 2. Зависимость перепада температур в процессе электронно-лучевого спекания (а) и спеченных образцов (б)

**Заключение.** На градиент температуры спеченных алюмохромных компактов оказывает влияние процентное содержание хрома, при этом нормированный к 1 мм перепад температур может достигать 100 °С. Также наличие большого количества хрома в компакте способствует снижению перепада температуры при электронно-лучевом спекании.

Исследования поддержаны в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ, проект FEWM-2021-0013.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Pietrzak K. Sintering Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr composites made from micro-and Nan powders / K. Pietrzak, M. Chmielewski, W. Włosiński // Science of Sintering. – 2004. Vol. 36, Iss. 3. – P. 171–177.
2. Бардаханов С. Структура и свойства нанокерамики на основе порошка оксида алюминия / С. Бардаханов, А. Ким, В. Лысенко, Н. Маслов, А. Номоев, И. Рожин, Д. Труфанов // Наноиндустрия. – 2009. – № 2. – С. 2–5.
3. Klimov A.S. Influence of electron-beam heating modes on the structure of composite ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics / A.S. Klimov, I.Yu. Bakeev, A.A. Zenin // 15th International Conference «Gas Discharge Plasmas and Their Applications», GDP–2021: Abstracts, Ekaterinburg. – 2021. – P. 108.

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
НА ПАРАМЕТРЫ БАРЬЕРА ШОТТКИ К N-SI  
НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ Ti/Ta/AU**

*Д.А. Шестерикова, А.Е. Шестериков, студенты каф. ФЭ*

*Научный руководитель П.Е. Троян, зав. каф. ФЭ, д.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, shesterikov.a.e@mail.ru*

Приведено исследование влияния технологической обработки на основные параметры барьера Шоттки на основе структуры Ti/Ta/Au к n-Si. Показано, что наибольшее влияние на характеристики барьера Шоттки оказывает термический отжиг контакта.

**Ключевые слова:** барьер Шоттки, электронно-лучевое испарение, быстрый термический отжиг (RTA), ВАХ, коэффициент идеальности, плотность тока насыщения.

Барьер Шоттки (БШ) является основой для работы многих полупроводниковых приборов, управляемых полем, таких как диоды Шоттки, полевые транзисторы и т.д. При этом при проектировании данных приборов необходимо учитывать, что характеристики получаемого БШ зависят не только от физических свойств материалов, но и в значительной степени определяются технологическими условиями производства [1]. Исходя из этого, целью данной статьи является анализ изменения основных параметров БШ в зависимости от технологической обработки на примере структуры Ti/Ta/Au к n-Si.

**Методика эксперимента.** Барьер Шоттки формировался к эпитаксиальному слою n-Si ( $\rho = 0,1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ), легированного Р, с кристаллографической ориентацией (111). Структура БШ была получена электронно-лучевым испарением (ЭЛИ) слоев Ti/Ta/Au на установке «EvoVac» от компании «Angstrom Engineering Inc.» (Канада). После производилось травление мезы на глубину эпитаксиального слоя и последующий отжиг БШ в установке для быстрого термического отжига «STE RTA70N» от компании SemiTEq (Россия) при температуре 360 °С.

Анализ параметров производился по прямой ветви ВАХ барьера Шоттки в координатах  $\ln I = f(U)$  (рис. 1) [2]. ВАХ измерялась по методу Кельвина с помощью анализатора полупроводниковых приборов «Agilent B1500A» (США).

По данной характеристике определялись следующие параметры:

1) плотность тока насыщения:

$$j_s = \frac{I_s}{S}; \quad (1)$$

2) высота барьера Шоттки

$$\phi_b = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left( \frac{A^* \cdot T^2}{j_s} \right); \quad (2)$$

3) коэффициент идеальности:

$$n = \frac{q}{k \cdot T \cdot \operatorname{tg} \alpha}; \quad (3)$$

4) сопротивление базы  $R_s$ , определяемое по отклонению ВАХ БШ от идеального (прямая линия), из-за падения напряжения на базе диода:

$$R_s = \frac{\Delta U}{I^*}, \quad (4)$$

где  $\Delta U$  – падение напряжения на базе диода;  $I^*$  – ток выхода зависимости  $\ln I = f(U)$  на участок насыщения.

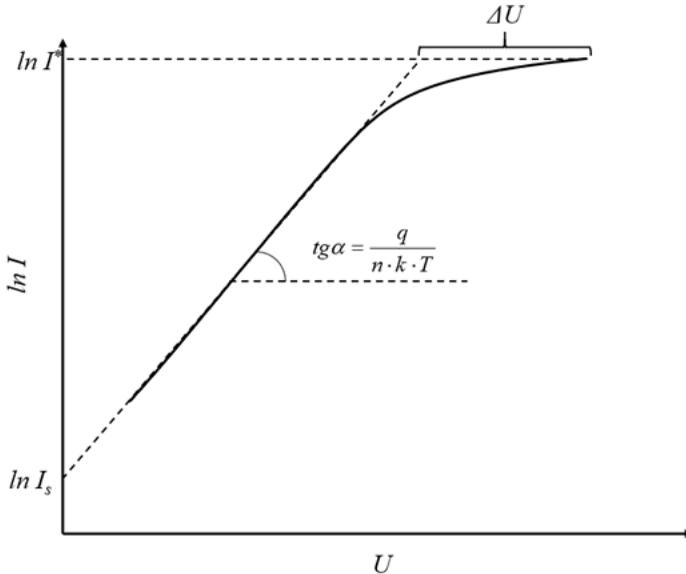


Рис. 1. Прямая ветвь ВАХ барьера Шоттки в координатах  $\ln I = f(U)$

**Результаты и их анализ.** На рис. 2 представлена ВАХ барьера Шоттки в координатах  $|I| = f(U)$  в зависимости от технологической обработки. Из зависимости видно, что по мере выполнения технологических операций над барьером Шоттки происходит уменьшение обратного тока через контакт. При этом наибольшее влияние оказывает процесс термического отжига БШ.

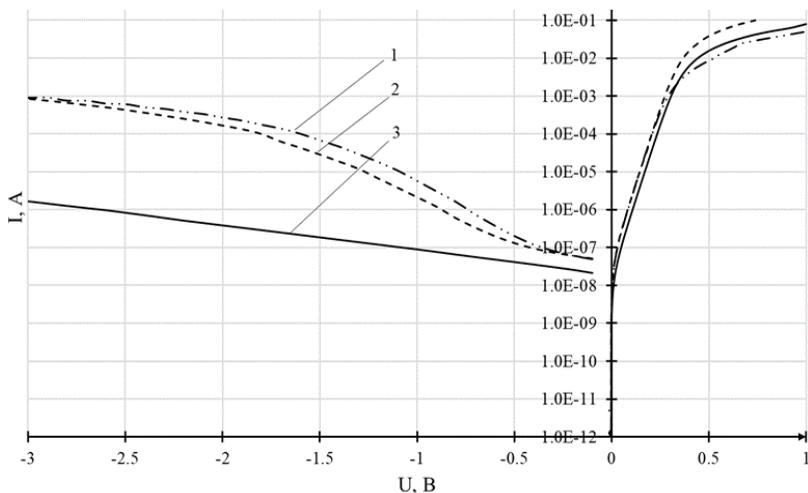


Рис. 2. ВАХ барьера Шоттки в координатах  $|I| = f(U)$  в зависимости от технологической обработки: 1 – до формирования мезы; 2 – после формирования мезы; 3 – после отжига

В таблице представлены расчетные данные параметров БШ. Визуализация изменения высоты барьера Шоттки и коэффициента идеальности представлена на рис. 3.

#### Расчетные данные параметров БШ

Параметр	До мезы	После мезы	После отжига
$j_s, \text{mA/cm}^2$	3,13	2,48	1,13
$\phi_b, \text{В}$	0,589	0,595	0,615
$n$	1,11	1,06	1,09
$R_s, \text{Ом}$	12,15	3,41	7,24

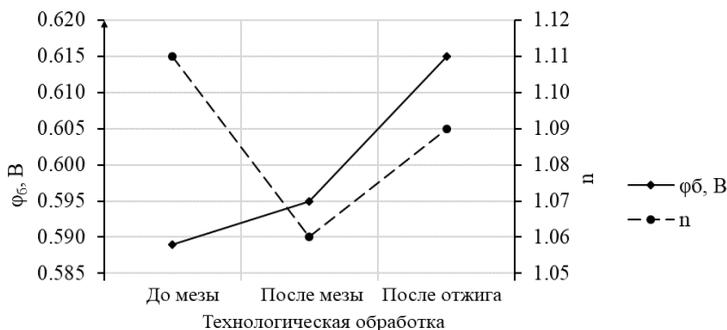


Рис. 3. Изменение параметров при технологической обработке

Итак, из полученных результатов можно сделать следующие выводы: термический отжиг барьера Шоттки увеличивает высоту потенциального барьера, что накладывает ограничения на температуру процессов после его формирования; коэффициент идеальности улучшается при формировании мезы, что можно объяснить устранением токов утечки по поверхности полупроводника [3]. В целом термический отжиг барьера Шоттки является необходимой операцией для стабилизации характеристик и параметров получаемого контакта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Nuhoglu C., Gulen Y. The effect of high temperature annealing on Schottky diode characteristics of Au/n-Si contacts // Vacuum. – 2010. – № 84. – P. 812–816.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: в 2 кн. – Кн. 1. – М.: Мир, 1984. – 456 с.
3. Analysis and control of excess leakage currents in nitride-based Schottky diodes based on thin surface barrier model // Journal of Vacuum Science and Technology. – 2004. – № 22 (4). – P. 2179–2189.

УДК 620.3

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В МИРЕ МЕМРИСТОРОВ

*М.А. Свириденко, аспирант каф. ФЭ*

*Научный руководитель П.Е. Троян, проф. каф. ФЭ, д.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, sviridenkom687@gmail.com*

Рассматриваются различные методики реализации мемристора с различными материалами и по различным технологиям, как эти материалы и технологии влияют на свойства и характеристики получаемого мемристора. Рассматривается, почему развитие мемристора очень актуально в наше время и откуда берет свое начало данный элемент.

**Ключевые слова:** мемристор, наноэлектроника, технологический процесс, синапс.

В микро- и наноэлектронике широко используются диэлектрические слои, работающие в сильных электрических полях ( $E > 10^6$  В/см). В этой области полей в диэлектрике возможны разрыв электронного газа и сопровождающие его явления: эмиссия электронов в вакуум, свечение, эффект переключения и памяти. На базе указанных эффектов возможно создание элементов нано- и микроэлектроники.

Один из новейших элементов наноэлектроники – мемристор – резистор с памятью. Предполагается, что этот элемент должен стать основой нового поколения энергозависимой памяти.

Мемристоры применяются в 3 областях: энергонезависимая память с высокой плотностью упаковки элементов, и низким энергопотреблением, способная объединить в одном устройстве оперативную и постоянную память, устройства процессинга внутри памяти, оптимизированные для параллельных вычислений, и аппаратные искусственные нейросети.

В реализации мемристоры гораздо проще, чем кремниевые транзисторы и обладают высокой плотностью упаковки. Они могут хранить информацию энергонезависимо. Это в сочетании может существенно сократить энергопотребление. Помимо этого, мемристоры могут воспроизводить некоторые функции синапса мозга, что делает возможным применять их для создания искусственных нейросетей.

Применение любых новых элементов требует совместного существования с уже существующими технологическими процессами, и помимо этого, они должны обладать хорошей надёжностью. Эта задача очень трудно реализуема на данный момент. Ученые по всему миру пытаются создать такой мемристор, который будет легко сопоставим с текущими технологиями, при этом обладать достаточным требованием совместимости и также мемристор будет выгоден с экономической стороны.

В связи с этим интересно посмотреть, каких успехов достигли в мире мемристоров, и какие технологии существуют на данный момент.

Следует отметить, что впервые концепт мемристора был предложен Леоном Чуа в 1971 г. как элемент, устанавливающий соотношение между прошедшим зарядом и изменением магнитного потока. Однако позже автор расширил определение на любые двухполюсники, способные изменять свое сопротивление и энергонезависимо сохранять состояние [1], и именно с этого началась история развития мемристора.

Далее развитие мемристоров продолжила фирма Hewlett-Packard, которая в апреле 2010 г. объявила о прогрессе в исследованиях мемристора: в лабораториях компании разработаны образцы ячеек со стороной 3 нм и скоростью переключения около одной наносекунды. Кроме того, учёным удалось создать трёхмерный массив таких элементов, способный выполнять логические операции и работающий аналогично синапсам – «сигнальным линиям» между нейронными клетками в мозгу человека [2]. В 2013 г. НР планировал запуск создания мемристора, но, как видно, до сих пор не получен ожидаемый результат.

В ФГУП НИИ ФП им. Ф.В. Лукина начаты исследования по разработке технологических процессов атомно-слоевого осаждения и

магнетронного распыления с целью формирования мемристоров для СБИС технологического уровня 32 нм. Основной топологический вариант изготовления мемристоров – пересечение взаимно перпендикулярных шин нижнего (первого) и верхнего (второго) слоев металла. Именно мемристор с такой структурой (простейший мемристор) обладает главными достоинствами резистивной памяти. Работа проводилась при поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы «Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники» на 2008–2015 гг. [3].

В октябре 2019 г. были изучены свойства мемристоров на основе поли-*n*-ксилена с внедрением наночастиц серебра и обнаружено, что внедрение наночастиц приводит к упущению основных мемристорных характеристик. Данные впоследствии могут использоваться для создания массивов мемристоров с однородными характеристиками, эмулирующих синапсы в нейроморфных вычислительных системах [4].

В марте 2020 г. были изучены мемристоры на основе наноразмерных слоев  $\text{LiNbO}_3$  и композита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  с толщинами 10 и 40 нм соответственно. Впервые продемонстрирован резкий переход от одно- к многофиламентному механизму резистивного переключения, возникающий при увеличении содержания металлической фазы в нанокompозите, который объяснен на основе модели [5].

В 2021 г. были созданы мемристоры на основе смешанных оксидов металлов, созданные методом магнетронного распыления, разработана технология, при которой формирование активного слоя и проводящих дорожек происходит в одном техническом модуле за чет того, что распыление производится из двух мишеней одновременно. Использование данного метода дает отсутствие примесей в отличие от метода атомного слоевого осаждения, и пленки равномерно распределяются по всей подложке. Контроль количества примеси осуществляется за счет акустических датчиков скорости осаждения пленки. Мемристор создан из материалов  $\text{W}/\text{Ti}_{0,93}\text{Al}_{0,07}\text{O}_x/\text{TiN}$ , данный материал имеет лучшее отношение сопротивлений включения и выключения по сравнению с диоксидом титана [6].

Существуют данные по разработке мемристоров на основе полипараксилена на гибких подложках. Помимо этого, создаются мемристоры на основе диоксидов ванадия титана, методом импульсного лазерного осаждения, бесформовые мемристоры на основе оксида гафния, обработанного в водородной плазме электрон-циклотронного резонанса. Это лишь малая часть разработок, которые ведутся по данной тематике в настоящее время.

В результате проведенного обзора можно сказать, что мемристор, созданный в далеком 1971 г., сейчас очень широко исследуется. Рассматриваются различные дополнительные материалы для улучшения характеристик, методики создания для встраивания в современные уже существующие технологии. Данный элемент решит множество проблем микроэлектроники и даст огромный скачок в развитии. Еще в 2013 г. планировался массовый запуск производства мемристоров, но он так и не произошел. В связи с этим создание мемристора очень актуально, а полученная информация поможет продвинуться в данной тематике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Chua L.O. Memristor-missing circuit element // IEEE Transactions: Circuit Theory. – 1971. – № 18. – P. 507–519.
2. Hutchby J. et al. Assessment of the Potential & Maturity of Selected Emerging Research Memory Technologies. – Workshop & ERD/ERM Working Group Meeting (itrs), 2010.
3. Гудков А., Гогин А., Кик А., Козлов А., Самусь А. Мемристоры – новый тип элементов резистивной памяти для наноэлектроники // Электроника – наука – технология – бизнес. – 2014. – Спецвыпуск.
4. Мацукатова А.Н., Емельянов А.В., Миннеханов А.А., Сахарутов Д.А., Вдовиченко А.Ю., Камышинский Р.А., Демин В.А., Рьльков В.В., Форш П.А., Чвалун С.Н., Кашкаров П.К. Мемристоры на основе поли-п-ксилена с внедренными наночастицами серебра // Письма в ЖТФ. – 2020. – Т. 46, вып. 2.
5. Никируй К.Э., Ильясов А.И., Емельянов А.В., Ситников А.В., Рьльков В.В., Демин В.А. Мемристоры на основе наноразмерных слоев  $\text{LiNbO}_3$  и композита  $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{V}_{20})_x(\text{LiNbO}_3)_{100-x}$  // Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62, вып. 9.
6. Бобилев А.Н. Магнетронная технология изготовления и электрические свойства мемристора на основе смешанных оксидов металлов: дис. ... кан. техн. наук: по ВАК РФ 01.04.15. – 2021. – 106 с.

## **ПОДСЕКЦИЯ 2.4**

### **ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

*Председатель – Семёнов В.Д., проф. каф. ПрЭ, к.т.н.; зам. председателя – Мехальченко С.Г., зав. каф. ПрЭ, д.т.н.; Оскирко В.О., н.с. лаб. прикладной электроники ИСЭ СО РАН, технический директор ООО «Прикладная электроника», к.т.н.*

УДК 681.5.017

#### **ВЫБОР КОРРЕКТИРУЮЩИХ ЗВЕНЬЕВ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ АВТОНОМНЫМ ОБЪЕКТОМ**

*И.Е. Гедзенко, аспирант; В.Д. Семёнов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, ipcyborg4030@yandex.ru*

Представлена методика, учитывающая особенности синтеза цифровых корректирующих звеньев в цепи обратной связи для цифровой системы управления электропитания автономным объектом на основе двухтрансформаторного преобразователя с применением пакета программ Matlab.

**Ключевые слова:** корректирующее звено, цифровая система управления, имитационная модель, Matlab Simulink.

Структурная схема системы электропитания автономным объектом показана на рис. 1. Её основными элементами являются аккумуляторная батарея (АБ), зарядно-разрядное устройство (ЗРУ), датчик тока (ДТ), фильтрующий конденсатор  $C$ , солнечная батарея (СБ), датчик напряжения (ДН), нагрузка  $R$ . Обратная связь представляет собой двухконтурную систему автоматического регулирования (САР) с подчиненным управлением.

Внешний контур данной связи отслеживает напряжение и формирует сигнал управления для внутреннего контура тока. Важными элементами в такой связи являются передаточные функции корректирующих звеньев контура напряжения  $G_U(z)$  и тока  $G_I(z)$ . В программе Matlab имеется ряд инструментов, позволяющих осуществить синтез корректирующих звеньев по имитационной модели.

Синтез корректирующих звеньев для такого типа обратной связи осуществляется в несколько этапов. На первом этапе определяется

передаточная функция разомкнутого контура тока. В программе Matlab Simulink её можно найти с помощью метода синусоидального воздействия [1]. Особенностью цифровых систем управления является влияние количества выборок сигнала за один период ШИМ на фазо-частотную характеристику (ФЧХ), которое характеризуется кратностью измерения. С ростом кратности измерения ФЧХ приближается к характеристике с аналоговой системой управления [2], поэтому с точки зрения быстродействия целесообразно увеличивать эту кратность. Для исследуемой имитационной модели кратность измерения была принята равной 4. По найденной частотной характеристике с помощью встроенных в Matlab алгоритмов определяется передаточная функция разомкнутого нескорректированного контура тока.

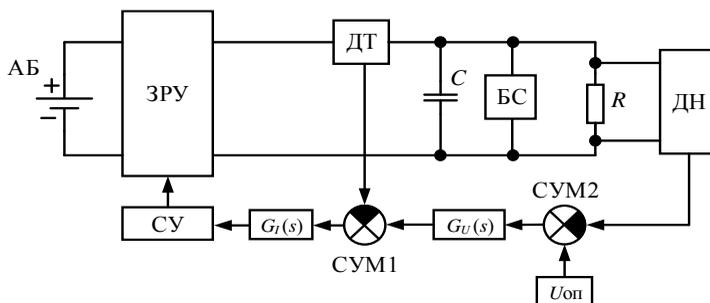


Рис. 1. Структурная схема с замкнутой обратной связью системы электропитания автономного объекта

На втором этапе для формирования передаточной функции разомкнутого скорректированного контура тока находится корректирующее звено контура управления током. Критерием выбора корректирующего звена является максимальное быстродействие при допустимых значениях запасов по амплитуде и фазе. В цифровых системах управления, в отличие от аналоговых, имеются ограничения на максимальную частоту сопряжения корректирующего звена, она не может превышать половину частоты ШИМ-сигнала [3]. На рис. 2 приведена частотная характеристика разомкнутого контура тока нескорректированной и скорректированной системы.

В качестве корректирующего устройства контура тока выбраны пропорциональное, инерционное и интегральное звенья:

$$G(z) = \frac{K \cdot (z - \tau)}{(z - 1)},$$

где  $K = 67,483$ ,  $\tau = 0,9939$ .

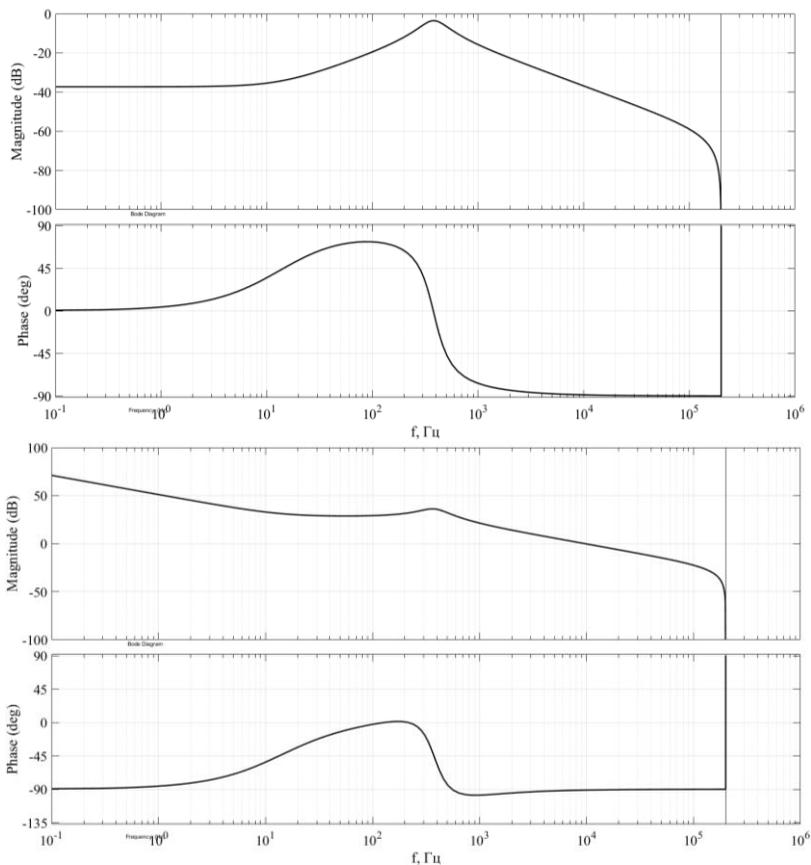


Рис. 2. Частотные характеристики нескорректированного и скорректированного разомкнутого контура тока

Третьим этапом является определение передаточной функции контура напряжения с учётом передаточной функции замкнутого контура тока. Методология определения передаточной функции совпадает с вышеописанным алгоритмом. Для полученной передаточной функции определяется корректирующее устройство. На рис. 3 приведены частотные характеристики разомкнутого нескорректированного и скорректированного контура напряжения.

В контуре напряжения в качестве корректирующего устройства выбраны пропорциональное, интегральное и дифференциальные звенья.

$$G(z) = \frac{K \cdot (z - \tau_1) \cdot (z - \tau_2)}{(z - 1) \cdot (z - T)}$$

где  $T = 0,07993$ ,  $K = 26,37$ ,  $\tau_1 = 0,9994$ ,  $\tau_2 = 0,6085$ .

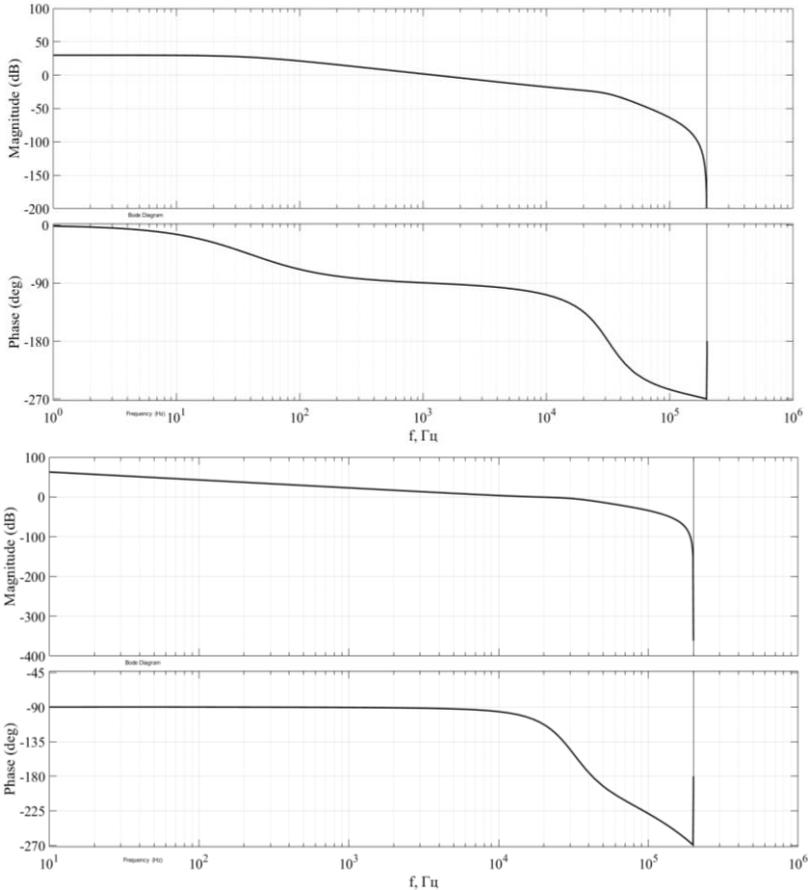


Рис. 3. Частотные характеристики нескорректированного и скорректированного разомкнутого контура напряжения

На рис. 4 и 5 показаны результаты эксперимента с набросом и сбросом нагрузки в режиме заряда и разряда АБ соответственно.

Максимальная величина перерегулирования напряжения составляет 1,5% и имеет колебательный характер, данные параметры определяются выбранными корректирующими звеньями. За счёт повышения времени переходного процесса величину перерегулирования

можно уменьшить, а характер переходного процесса сделать аperiодическим. Повышение пульсаций тока батареи и выходного напряжения при изменении сопротивления нагрузки обусловлено выбранными значениями выходной ёмкости и индуктивностью намагничивания трансформаторов.

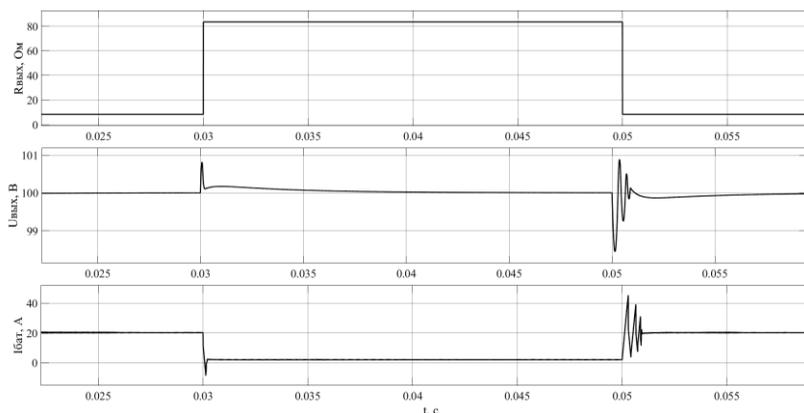


Рис. 4. Осциллограммы сопротивления нагрузки, выходного напряжения и тока батареи в режиме заряда АБ

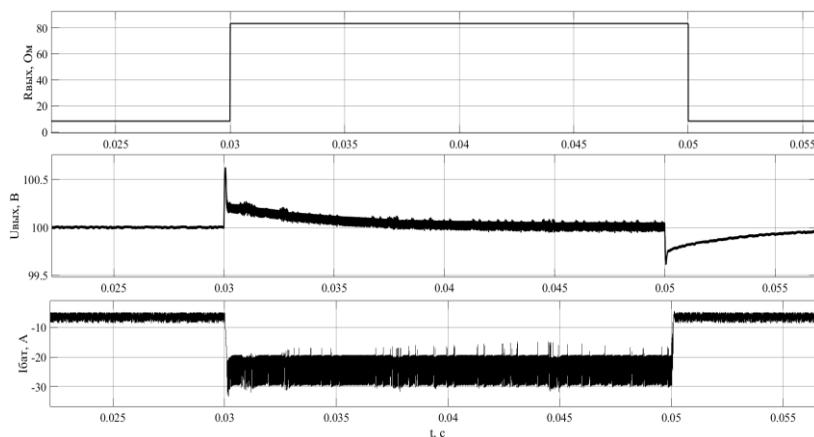


Рис. 5. Осциллограммы сопротивления нагрузки, выходного напряжения и тока батареи в режиме разряда АБ

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов В.П. MatLab R2007/2008/2009 для радионинженеров. – М.: ДМК-Пресс, 2010. – 976 с.
2. Гедзенко И.Е., Семёнов В.Д., Кабиров В.А. Сравнение фазовых характеристик цифровых широтно-импульсных модуляторов // Электронные сред-

ства и системы управления: матер. докл. XVII Междунар. науч.-практ. конф. (17–19 ноября 2021 г.): в 2 ч. – Томск: В-Спектр, 2021. – Ч. 1. – С. 185–188.

3. Мелешин В.И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / В.И. Мелешин, Д.А. Овчинников. – М.: Техносфера, 2011. – 576 с.

УДК 543.27.08.068.2

## РАЗРАБОТКА ПЛАТЫ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОАНАЛИЗАТОРА ДЛЯ УСТАНОВКИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

*М.А. Кокишаров, студент*

*Научный руководитель Г.В. Арьшева, доцент*

*ОЭИ ИШНКБ НИ ТПУ, к.т.н.*

*г. Томск, ТПУ, mak74@tpu.ru*

В современной энергетике и материаловедении всё чаще встречаются плазменные реакторы, с помощью которых осуществляется синтез наноструктур и пиролитическое разложение полимеров и твердых сплавов. Одна из проблем, с которой сталкиваются пользователи этих установок, – это отсутствие контроля воздушной среды внутри реактора при проведении опытов, что сказывается на качестве производимых процессов. В данной работе приводятся результаты разработки специального газоанализатора для одной из плазмохимических установок, расположенной в Томском политехническом университете.

**Ключевые слова:** реактор, плазмохимический синтез, газоанализатор, воздушная среда, газовый сенсор, концентрация.

Установка плазмохимического синтеза состоит из генератора постоянного тока, микроконтроллерной системы управления и датчиков контроля состояния. На рис. 1 изображена упрощенная структурная схема установки.

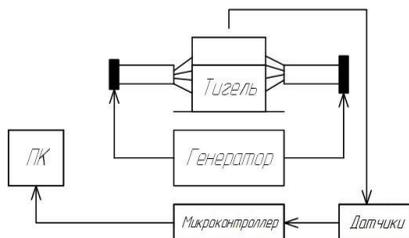


Рис. 1. Структурная схема установки

При проведении плазмохимических процессов сквозь материал внутри тигля пропускается высокоэнергетическая плазменная дуга. В

ходе опыта контролируются ток и напряжение между электродами генератора, а также метеоусловия в помещении: температура и влажность воздуха [1].

При проведении опытов выявлено, что химические реакции внутри тигля сопровождаются интенсивным выделением газов: водорода  $H_2$  (пиковой концентрации 14,7%) [2], кислорода  $O_2$  (пиковой концентрации 10%) [2], метана  $CH_4$  (27,5%) [2], углекислого и угарного газа  $CO_2$  и  $CO$  (6%) [3], диоксида серы  $SO_2$  (0,65%) [2], а также монооксида азота  $NO$  в незначительных концентрациях (1000 ppm) [2].

**Цель работы:** исследование существующих газовых сенсоров и выбор компонентной базы, анализ принципов функционирования газоанализаторов, проектирование электрической схемы и печатной платы устройства газоанализатора.

По итогу исследования выявлены преимущества и недостатки разных типов газовых сенсоров. В таблице приводятся краткие параметры сенсоров, используемых при проектировании газоанализатора. Основным критерий выбора – соответствие предельной измеряемой сенсором концентрации газа значениям количества каждого из выделяющихся газов, полученным в ходе экспериментов.

**Результат выбора газовых сенсоров**

Целевой газ	Максимальная измеряемая сенсором концентрация	Тип сенсора
$O_2$	25%	Электрохимический
$H_2$	4%	Электрохимический
$NO$	2000 ppm	Электрохимический
$SO_2$	10000 ppm	Электрохимический
$CO$	40000 ppm	Электрохимический
$CO_2$	30%	Инфракрасный оптический
$CH_4$	50%	Инфракрасный оптический

Разработаны принципиальные схемы для плат управления сенсорами на основании технической документации и рекомендаций производителя. На рис. 2 приводится одна из принципиальных схем, разработанная для сенсора на угарный газ. На рис. 3 приведена иллюстрация результатов разводки печатной платы и проектирования печатного узла в САПР Altium Designer.

**Результаты:** проведены исследование и анализ существующих газовых сенсоров; подобраны модели сенсоров; проведен анализ предъявляемых к сенсорам технических и эксплуатационных требований; разработаны схемы управления и печатные узлы для каждого из сенсоров.

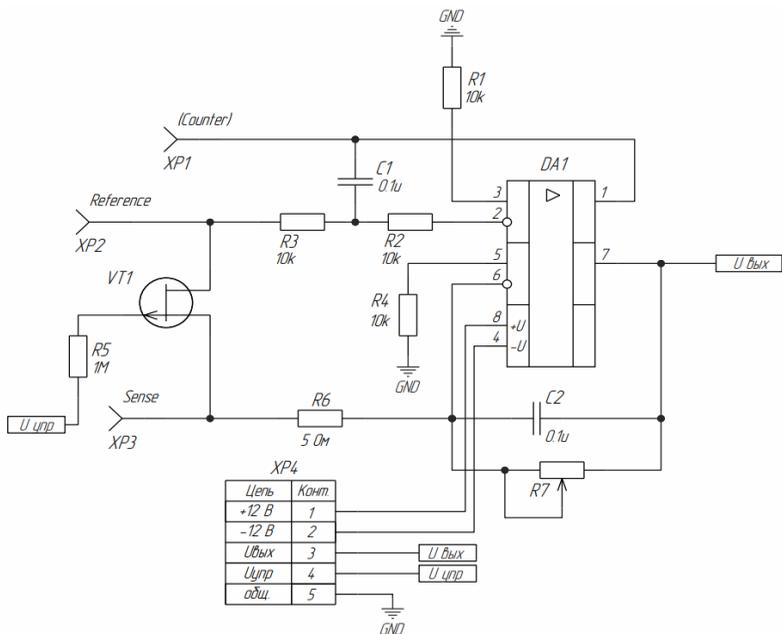


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная платы управления одним из сенсоров

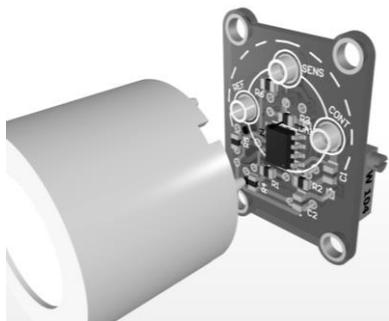


Рис. 3. Печатный узел управления газовым сенсором

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2700596 РФ, МПК C01B 32/991, B22F 9/14. Устройство для получения порошка на основе карбида бора / Р.С. Мартынов (РФ), А.Я. Пак (РФ), Г.Я. Мамонтов (РФ). – № 2019111857 / 19; заявл. 19.04.2019; опубл. 18.09.2019. Бюл. № 26.

2. Pak A.Ya., Larionov K.B., Kolobova E.N., Slyusarskiy K.V. et al. A novel approach of waste tires rubber utilization via ambient air direct current arc dis-

charge plasma // Fuel Processing Technology. – 2022. – Vol. 227. – P. 107111 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107111>, свободный (дата обращения: 10.02.2022).

3. Pak A.Ya., Shanenkov I.I., Mamontov G.Y., Kokorina A.I. Vacuumless synthesis of tungsten carbide in a self-shielding atmospheric plasma of DC arc discharge // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2020. – Vol. 93. – P. 105343 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105343>, свободный (дата обращения: 10.02.2022).

УДК 621.314.12

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛУМОСТОВОГО РЕЗОНАНСНОГО LLC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

***Т.В. Лобанова, студентка; В.Д. Семёнов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, каф. ПрЭ, [tatyanalobanova1997@gmail.com](mailto:tatyanalobanova1997@gmail.com)***

Проведен анализ и построена математическая модель полумостового резонансного LLC-преобразователя, для чего применен метод коммутационных разрывных функций (КРФ). Построена структурная схема полумостового резонансного LLC-преобразователя и на ее основе выведена система дифференциальных уравнений, описывающая электромагнитные процессы в преобразователе. Полученная система может быть решена в среде MathCad.

**Ключевые слова:** полумостовой резонансный LLC-преобразователь, источники питания, понижающий преобразователь, импульсный источник питания, силовая электроника, математическое описание, система дифференциальных уравнений, математическое моделирование.

Полумостовой резонансный LLC-преобразователь в настоящее время популярен ввиду своей высокой энергоэффективности. Построение его математической модели, которая лаконично объясняет и иллюстрирует электромагнитные процессы, происходящие в преобразователе, является актуальной задачей.

Математическая модель преобразователя построена в соответствии с методикой КРФ в пространстве переменных состояния, с которой можно ознакомиться в [1]. С помощью КРФ можно построить структурную схему исследуемого преобразователя, наглядно иллюстрирующую его внутренние связи, определяющие его динамические свойства и характеристики.

Функциональная схема полумостового резонансного LLC-преобразователя представлена на рис. 1. Он выполнен на управляемых с помощью частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) ключах  $VT_1$ – $VT_2$ .

Индуктивность намагничивания  $L_m$  трансформатора  $TV_1$ , интегрированного с дросселем, изображена в виде отдельного элемента схемы [1] для более точного отображения протекающих в схеме электромагнитных процессов. Драйвер представлен в виде блока с одним входом и двумя выходами на два транзистора. Датчик напряжения ДН также представлен в виде блока.

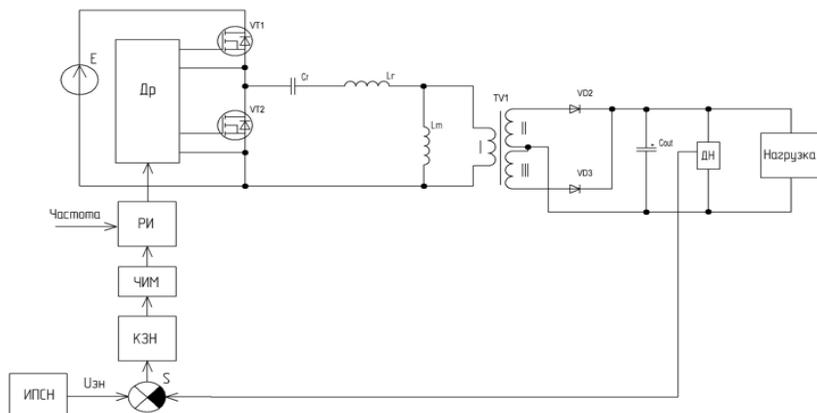


Рис. 1. Схема электрическая функциональная полумостового резонансного LLC-преобразователя

На схеме здесь и далее приняты следующие обозначения: ИПСН – источник питания собственных нужд;  $U_{зн}$  – задающее напряжение;  $S$  – сумматор; КЗН – корректирующее звено по напряжению; ЧИМ – частотно-импульсный модулятор; РИ – распределитель импульсов; Др – драйвер; ДН – датчик напряжения.

Силовые ключи  $VT_1$ – $VT_2$  заменяются силовым четырехполюсником с управляющим входом, на который можно подать некоторую функцию, задающую форму выходного напряжения преобразователя. При этом силовые ключи, образующие преобразователь, представлены аналоговым перемножителем. Если подключить такой перемножитель вместо ключей в схему (см. рис. 1), то получим гибридную схему, содержащую четырехполюсник, идеальный трансформатор  $TV_1$  и двухполюсные элементы  $L_m$ ,  $R$ ,  $r_{Lm}$  и др., что по-прежнему затрудняет математическое описание преобразователя. Для перехода к схеме с одинаковыми элементами заменим остальные элементы (двухполюсники) преобразователя так, как описано в [1].

Конденсаторы с емкостью  $C$  и дроссели с индуктивностью  $L$  заменим интеграторами напряжения и тока соответственно. Резисторы –

размерными коэффициентами передачи напряжения в ток или тока в напряжение.

В результате получим структурную схему преобразователя, представленную на рис. 2.

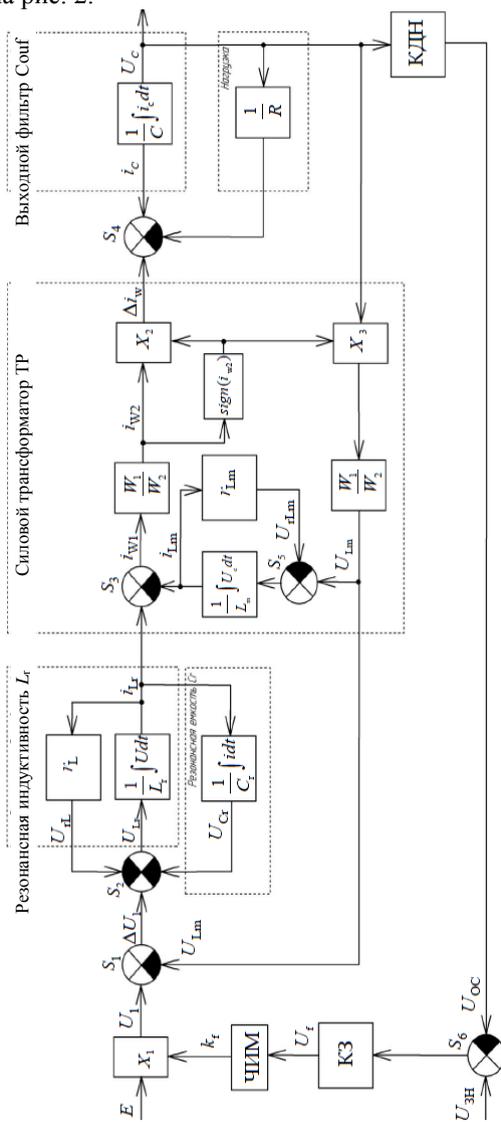


Рис. 2. Математическая модель полумостового резонансного LLC-преобразователя



Далее рассматриваем контуры цепи в схеме рис. 3, в которые входят накопители энергии –  $L_r$ ,  $C_r$ ,  $L_m$ ,  $C$ . Принимая во внимание, что для каждого интегратора выходную величину можно выразить как интеграл от алгебраической суммы входных величин, выраженных через переменные состояния, которыми являются выходы упомянутых интеграторов, составляем интегральные уравнения для всех интеграторов.

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{L_r} = \frac{1}{L_r} \int (E \cdot k_f - U_C \cdot \frac{W_1}{W_2} \cdot \text{sign}(i_{W_2}) - U_{C_r} - i_{L_r} \cdot r_L) dt, \\ U_{C_r} = \frac{1}{C_r} \int i_{L_r} dt, \\ i_{L_m} = \frac{1}{L_m} \int \left( U_C \cdot \frac{W_1}{W_2} \cdot \text{sign}(i_{W_2}) - i_{L_m} \cdot r_{L_m} \right) dt, \\ U_C = \frac{1}{C} \int \left[ (i_{L_r} - i_{L_m}) \cdot \frac{W_1}{W_2} \cdot \text{sign}(i_{W_2}) - \frac{U_C}{R} \right] dt. \end{array} \right. \quad (1)$$

Дифференцируя систему интегральных уравнений (1), получим систему дифференциальных уравнений (2) (форма Коши) в пространстве переменных состояния, приведенную ниже:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{L_r}}{dt} = \frac{1}{L_r} \left( E \cdot k_f - U_C \cdot \frac{W_1}{W_2} \cdot \text{sign}(i_{W_2}) - U_{C_r} - i_{L_r} \cdot r_L \right), \\ \frac{dU_{C_r}}{dt} = \frac{1}{C_r} i_{L_r}, \\ \frac{di_{L_m}}{dt} = \frac{1}{L_m} \left( U_C \cdot \frac{W_1}{W_2} \cdot \text{sign}(i_{W_2}) - i_{L_m} \cdot r_{L_m} \right), \\ \frac{dU_C}{dt} = \frac{1}{C} \left[ (i_{L_r} - i_{L_m}) \cdot \frac{W_1}{W_2} \cdot \text{sign}(i_{W_2}) - \frac{U_C}{R} \right]. \end{array} \right. \quad (2)$$

Систему дифференциальных уравнений (2), описывающую электромагнитные процессы в полумостовом резонансном LLC-преобразователе, можно численно решить в среде MathCad и найти переменные состояний. Если переменные состояний являются выходными величинами преобразователя, как в нашем случае, то решение системы на этом заканчивается. В противном случае для нахождения выходных величин их нужно выразить через найденные переменные состояний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кобзев А.В., Семенов В.Д., Фединых Е.К. Применение метода коммутационных разрывных функций для построения математических моделей силовых преобразователей // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2. – С. 58–63.
2. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
3. Design-Oriented Steady-State Analysis of LLC Resonant Converters Based on FHA / S. De Simone, C. Adragna, C. Spini, G. Gattavari // Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. – 2006. – P. 1–23.

УДК 621.311.69

### ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ СВЕТОДИОДНЫХ МОДУЛЕЙ С УПРАВЛЕНИЕМ ПО ПРОТОКОЛУ DALI

*Ю.В. Савельев, магистрант каф. ПрЭ*

*Научный руководитель А.В Осипов, доцент каф. ПрЭ, к.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, yurasavel@mail.ru*

Приведены методы диммирования светового потока светодиодов на основе амплитудной и широтно-импульсной модуляции. Разработаны схема управления диммируемым источником питания для светодиодных модулей и способ сопряжения с микроконтроллером и протоколом DALI цифровой адресной системы освещения. Представлена функциональная схема источника питания светодиодных модулей с управлением по протоколу DALI. Представлены результаты имитационного моделирования в среде LTspice.

**Ключевые слова:** источник питания, светодиодные модули, светодиодные светильники, протокол управления DALI, обратноходовой преобразователь.

В настоящее время светодиодное освещение набирает высокую популярность, вытесняя привычные для нас источники света: галогенные лампы, лампы накаливания, люминесцентные лампы и др. Причиной такой популярности является множество преимуществ светодиодного освещения перед остальными искусственными источниками света: низкое энергопотребление, длительный срок службы, который составляет 50 000 ч без потери основных характеристик, высокая контрастность и цветопередача и др.

Одним из важных преимуществ светодиодного освещения является возможность управления световым потоком по сравнению с традиционными газоразрядными лампами. При помощи светодиодных светильников достаточно просто организовать плавное управление световым потоком (димминг) в ручном или автоматическом режиме, в

зависимости от условий эксплуатации и назначения устройства. Условия эксплуатации включают в себя: изменение светового потока в зависимости от времени суток, присутствие в освещаемой зоне человека, температуру освещения и т.д.

Используемые методы диммирования – аналоговые, цифровые. Общий способ регулировки яркости заключается в изменении яркости в аналоговом режиме путем регулировки значения постоянного тока в диапазоне от 0 до 10 А. Аналоговое диммирование требует большего количества компонентов, имеет сложную схемную архитектуру и ограниченный набор функций, поэтому не подходит для применения в больших системах [1]. Для реализации многофункциональной и доступной системы освещения создан протокол цифрового адресного интерфейса освящения (DALI) [2]. Через этот протокол производится индивидуальное, групповое и широковещательное управление системой освещения с интеллектуальными функциями управления. Метод диммирования светового потока может быть основан на амплитудной модуляции (рис. 1, *а*), при которой изменение яркости производится изменением значения тока светодиода, но этот метод приводит к изменению пиковой длины волны светодиода, поэтому цвет света будет «плыть». Второй подход основан на широтно-импульсной модуляции (рис. 1, *б*), при этом подходе средний ток светодиода изменяется регулированием интервала проводимости последовательного включенного ключа, что поможет достичь затемнения. Ток транзистора при широтно-импульсной модуляции поддерживается на уровне тока светодиода, поэтому цвет стабилен [3].

Для стабилизации выходного тока с возможностью его регулирования последовательно с нагрузкой устанавливается источник тока, в качестве которого используется стабилизатор тока на операционном усилителе, работающий в линейном (активном) режиме (рис. 1, *в*). Источник тока, включенный в цепь светодиодной нагрузки, стабилизирует выходной ток. Датчик тока выполнен на шунтовом резисторе, включённом последовательно со светодиодной нагрузкой, при этом ток светодиодов ограничивается на уровне 350 мА, что позволяет не устанавливать ограничительные резисторы. Значение тока источника определяется значением напряжения на неинвертирующем входе операционного усилителя, на который подается напряжение управляющего сигнала с интерфейса DALI. Элементы C1, C2, R3, R4 преобразуют ШИМ-сигнал в постоянное опорное напряжение, пропорциональное коэффициенту заполнения. Резистор R8 является измерительным, его напряжение выравнивается с опорным напряжением, получаемым из ШИМ-сигнала. Резистор R8 определяет максималь-

ный ток нагрузки при 100% заполнении управляющего ШИМ-сигнала. Цепи коррекции C3, C4, R5 выполняют функцию пропорционально-интегрирующего (ПИ) регулятора в полезной полосе частот, при высоких частотах выполняют функцию интегрирующего звена (интегратора). Представлен способ сопряжения интерфейса DALI с источником питания, разработанного на базе обратного преобразователя, функциональная схема которого представлена на рис. 2.

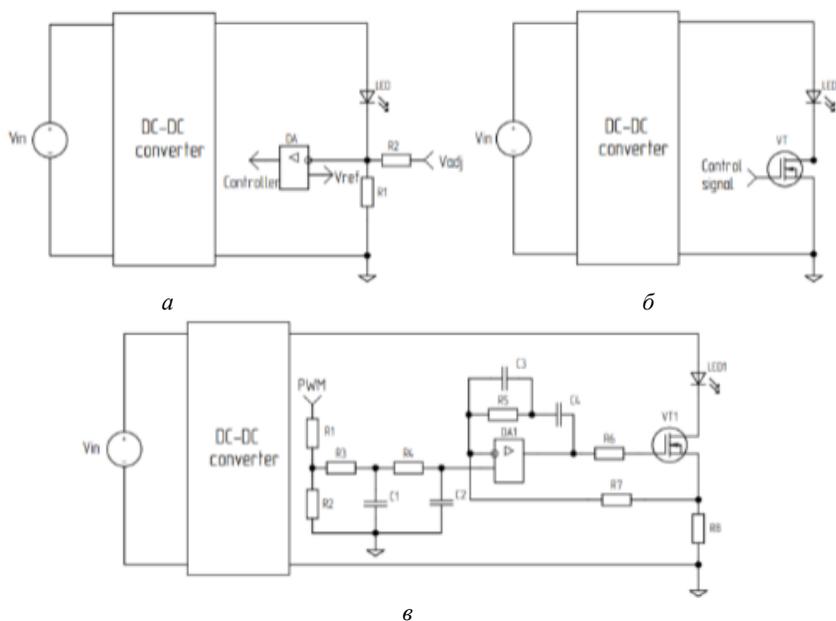


Рис. 1. Методы диммирования амплитудная модуляция – а; широтно-импульсная модуляция – б; стабилизатор тока, работающий в активном режиме, – в

Источник питания собственных нужд обеспечивает питание источника тока и контроллера с интерфейсом DALI, который формирует ШИМ-сигнал для управления источником тока светодиодов. Для имитационного моделирования схемы источника питания была выбрана среда моделирования LTspice XVII.

В качестве нагрузки источника питания используется схема замещения светодиодных модулей. В качестве имитации сигнала, поступающего с интерфейса DALI, выступает V6 как источник ШИМ-импульсов. Схема замещения реализована диодом D9, резистором R18 и источником напряжения V2. Амплитуда напряжения и тока на

нагрузке при подаче ШИМ-сигнала с полным заполнением устанавливается в пределах 115 В и 350 мА (рис. 3). осциллограммы напряжения и тока на нагрузке при подаче ШИМ-сигнала 50% устанавливаются в пределах 113 В и 178 мА, что доказывает работоспособность способа управления.

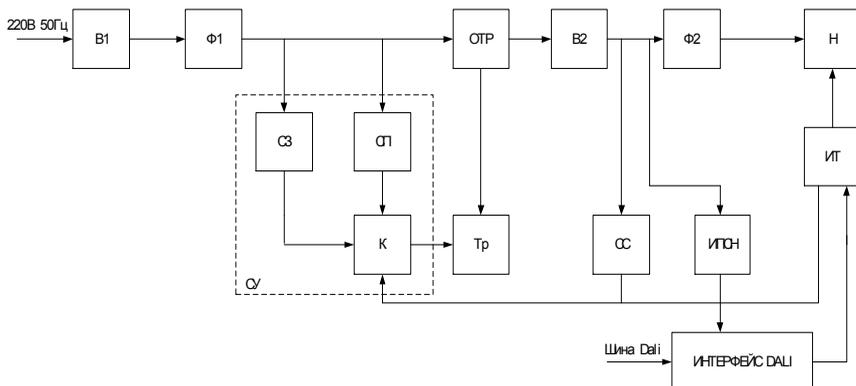
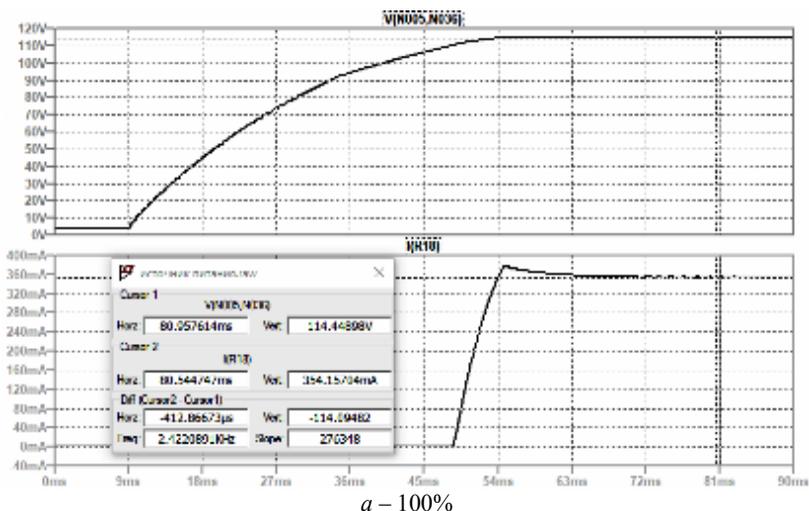
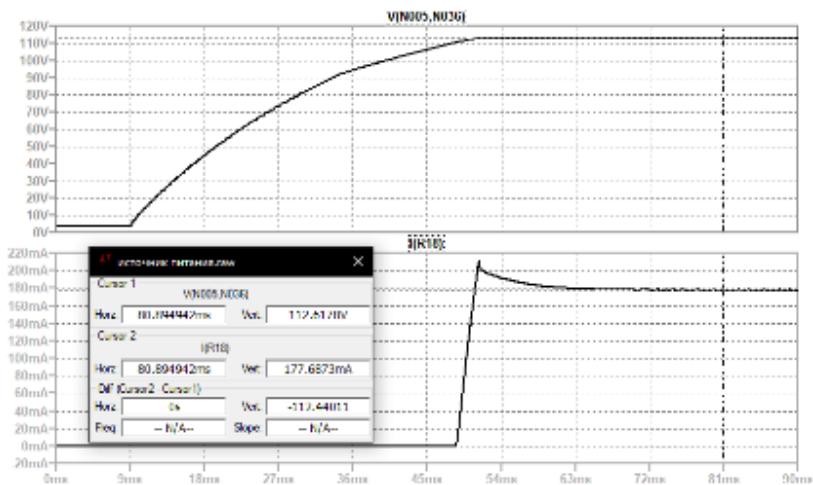


Рис. 2. Схема электрическая функциональная источника питания:  
 B1, B2 – выпрямитель; СП – схема питания; Ф1, Ф2 – фильтр; СС – система сравнения; ОТР – обратногоходовой трансформатор; Тр – силовой транзистор;  
 СУ – система управления; К – контроллер; СЗ – схема запуска; ИТ – источник тока; ИПЧН – источник питания собственных нужд; Н – нагрузка



$a - 100\%$   
 Рис. 3 (начало)



$\delta - 50\%$

Рис. 3 (окончание). Диаграммы напряжения и тока на нагрузке при подаче ШИМ-сигнала 100%

Разработаны схема управления диммируемым источником питания для светодиодных модулей и способ сопряжения с микроконтроллером и протоколом DALI цифровой адресной системы освещения. Разработанный метод управления и способ сопряжения протокола DALI с источником питания для светодиодных модулей обеспечивает выходное напряжение в 115 В при токе нагрузки 350 мА и пульсациями выходного тока менее 1%. Широкодиапазонное изменение яркости свечения светодиодов достигнуто путем изменения коэффициента заполнения ШИМ-сигнала без мерцания от 0 до 100%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Juang J.C., Wang H.C., Lu C.L., Chen W.M., Hsu C.W. A Touch-Dim Network for the Dimming Control of Lighting System // IEEE International Conference on Computational Aspects of Social Networks. – 2010. – P. 183–186.
2. Lan D.C. Research of Fluorescent Lamp Lighting System Based on the DALI Protocol // M.S. thesis, EE. Dept, NCKU. – Tainan, Taiwan, 2006.
3. Rodrigues W.A., Morais L.M.F., Donoso-Garcia P.F., Cortizo P.C., Seleme S.I. Comparative Analysis of Power LEDs Dimming Methods // IEEE 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – 2011. – P. 2907–2912.

## ИСПЫТАНИЕ ДРОССЕЛЯ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

*В.А. Шарыгин, аспирант каф. ПрЭ*

*Научный руководитель С.Г. Михальченко, зав. каф. ПрЭ, д.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, slava.sharygin@mail.ru*

Представлены функциональная схема системы токовой защиты от короткого замыкания, схема испытаний дросселя и его исследования для различных вариантов исполнения.

**Ключевые слова:** накопительный дроссель, короткое замыкание, токовая защита, время нарастания.

Проектируемое устройство токовой защиты состоит из управляемого ключа с обратной связью, дросселя ограничения скорости нарастания тока, фильтра (рис. 1).

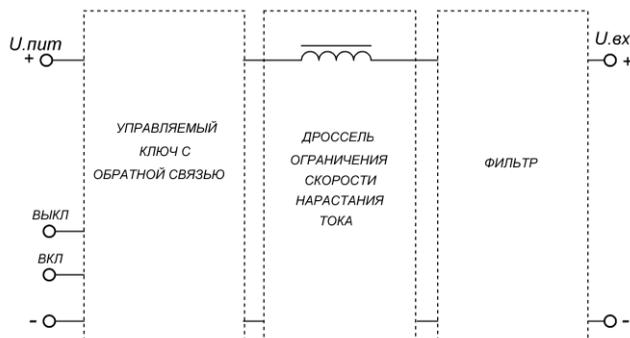


Рис. 1. Функциональная схема устройства токовой защиты [1]

Принцип токовой защиты от короткого замыкания заключается в следующем: при возникновении короткого замыкания в устройстве ток нарастает до максимально допустимого значения, затем система разрывает цепь питания, дроссель, ограничивая скорость нарастания тока, обеспечивает необходимое время для обработки сигнала обратной связи и выключения системы. В качестве ключа могут выступать автоматические выключатели и мощные транзисторы, устанавливаемые чаще всего в виде модулей.

Проблема состоит в обеспечении необходимого временного промежутка, за который ток не превысит максимально возможное значение и устройство успеет отключить потребителя от сети питания. Однако это время должно быть достаточно большим, чтобы система не

выдавала ложного отключения при кратковременных помехах и скачках тока, к примеру, во время протекания пускового тока.

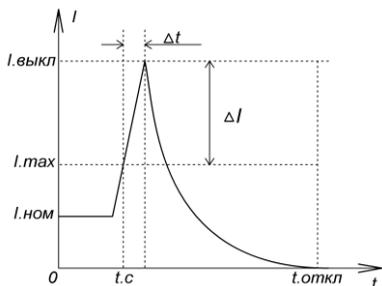


Рис. 2. Диаграмма тока, протекающего через систему защиты во время короткого замыкания

Значительными габаритами в схеме рис. 1 обладает дроссель ограничения скорости нарастания тока, тогда в первую очередь для определения габаритов новой системы необходимо произвести расчет дросселя, а затем экспериментальным путем проверить его характеристики, необходимые для обеспечения нужной временной задержки линейного нарастания тока.

Определение времени нарастания и количества витков дросселя определяется из формул (1) и (2):

$$\Delta t = \frac{L \cdot \Delta I}{U_L}, \quad (1)$$

$$W_L = \frac{U_L \cdot \Delta t}{B_{\max} \cdot S_C \cdot 10^{-4}}, \quad (2)$$

где  $\Delta I$  – изменение тока за время  $\Delta t$ ,  $U_L$  – напряжение на дросселе,  $L$  – индуктивность дросселя,  $B_{\max}$  – максимальная индукция дросселя,  $S_C$  – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Дроссель постоянного тока излучает электромагнитное поле, которое может существенно повлиять на чувствительную аппаратуру, особенно при протекании через него тока короткого замыкания, поэтому автором рекомендуется экранировать дроссель из ферромагнитного материала (стали), в конструкции которого наблюдается явное выпучивание магнитного поля, чтобы магнитный поток замыкался через экран. Индуктивность дросселя напрямую влияет на время нарастания тока. Для уменьшения активного сопротивления дросселя и увеличения индуктивности дросселя одним из возможных решений является включение в катушку магнитопровода с большой индукцией насыщения до 1,5 Тл.

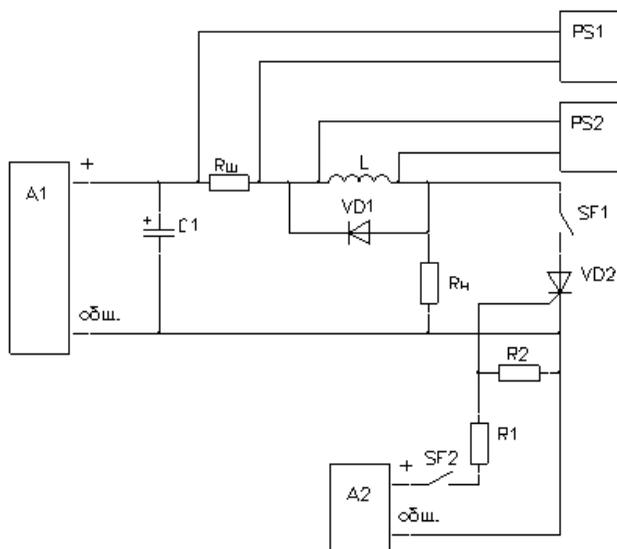


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

- A1, A2 – лабораторный источник питания;  $C_1$  – накопительная конденсаторная батарея, необходимая для имитации скачка тока;  
 $R_{ш}$  – шунт при помощи которого можно измерить значение тока дросселя;  
 $R_{н}$  – сопротивление нагрузки; VD1 – обратный диод дросселя;  
 VD2 – тиристор; SF1 – автоматический выключатель;  
 PS1, PS2 – осциллографы;  $L$  – исследуемый дроссель;  
 $U_{пит}$  – напряжение источника питания

В качестве магнитопровода в испытаниях были использованы типы сердечников стержневой и кольцевой, состоящие из материалов: шихтованная электротехническая сталь, сплошной брусок из стали. Наиболее эффективным оказался брусок из стали. Помещая дроссель в экран, также увеличивается его индуктивность, так как магнитный поток замыкается и через него. Измеренная индуктивность катушки без магнитопровода  $L_0$  в 2–3 раза меньше, чем в катушке с магнитопроводом, помещенной в экран  $L_m$ .

**Методика проведения испытаний:** автоматический выключатель SF1 приводится во включенное состояние, на вход подается постоянное напряжение от источника питания, затем замыканием ключа SF2 на тиристор VD2 подается управляющее напряжение, после которого он открывается. Ток короткого замыкания начинает протекать через автоматический выключатель SF1 до тех пор, пока он не выключится. Тем самым создается бросок тока, максимальная амплитуда

и время нарастания которого ограничены накопительным дросселем  $L_1$ , поскольку большинство источников питания имеют ограничение по току. На входе поставлена накопительная емкость  $C_1$ , которая разряжаясь, обеспечивает необходимую амплитуду. При помощи осциллографов фиксируется падение напряжения на дросселе и ток, значение которого снимается с шунта  $R_{ш}$ .

На рис. 4 представлены осциллограммы тока дросселя и напряжения на дросселе, исследованного по методике с целью подтверждения расчета. Измеренная индуктивность дросселя составляет  $L = 154$  мкГн.

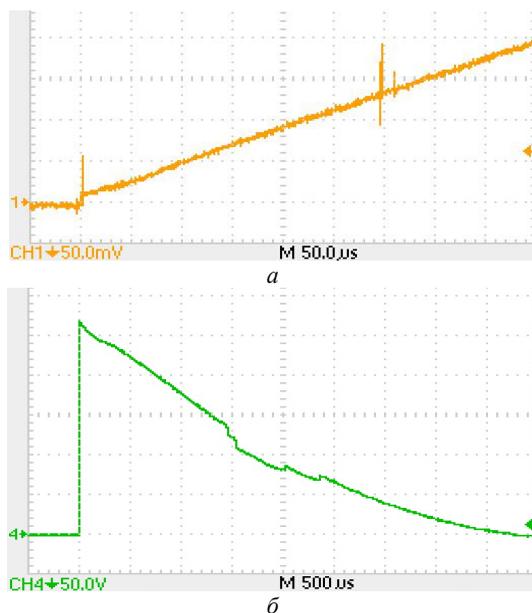


Рис. 4. Осциллограммы: а – тока дросселя, 50 мВ соответствуют 200 А; б – напряжения на дросселе

Из полученных результатов следует: за время задержки  $\Delta t = 225$  мкс, необходимого на включение системы токовой защиты, ток возрастает до  $\Delta I = 400$  А, из расчета по формуле (1) при  $\Delta t = 225$  мкс,  $U_L = 270$  В, следует:  $\Delta I = 394,4$  А. Экспериментальная методика и расчет практически совпадают с небольшим отклонением.

**Заключение.** В ходе проведенной работы были разработаны простая и эффективная методика проверки характеристик дросселя ограничения скорости нарастания тока, а также схема экспериментальной

установки, по которой удобно исследовать временные токовые характеристики дросселей различных вариантов исполнения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Схемы токовой защиты [Электронный ресурс]. – <https://acums.ru/bespereboyniki-i-bloki-pitaniya/skhema-zaschity-ot-kz-dlya-bloka-pitaniya> (дата обращения: 14.10.2021).
2. Токовая защита от короткого замыкания [Электронный ресурс]. – <https://zapitka.ru/pitanie/shema-zaschity-ot-korotkogo-zamykaniya-v-bloke-pitaniya> (дата обращения: 14.10.2021).

УДК 621.316.91

### ПУСКОВЫЕ МОМЕНТЫ В ИСКРОБЕЗОПАСНЫХ СИСТЕМАХ ПИТАНИЯ

*И.О. Суховерков, аспирант каф. ПрЭ*

*Научный руководитель С.Г. Михальченко, зав. каф. ПрЭ, д.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, syhoverkovio@gmail.com, msg@ie.tusur.ru*

Рассмотрена часть искрозащитного барьера с точки зрения его функционирования и безопасности согласно ГОСТ 31610.11–2014 [1]. В статье предложено решение запуска искробезопасного оборудования с пусковым током, который превышает максимальный выходной параметр источника. Такие режимы запуска у искробезопасного оборудования имеют место быть не только в первый момент времени пуска, но и при коммутации нагрузок внутри устройства. Следовательно, классические схемы ограничения пускового тока в этом случае не могут применяться.

**Ключевые слова:** искробезопасность, защитные цепи, взрывоопасные среды, ограничители напряжения, неповреждаемость.

Все искрозащитные цепи и узлы по своей сути являются жёсткими ограничителями электрических параметров. Для ограничения фактической мощности искры короткого замыкания и предотвращения дальнейшего воспламенения взрывоопасной смеси необходимо добиться таких выходных параметров, чтобы энергия искры была меньше, чем необходимая для обеспечения цепной реакции. Для этого служат цепи, которые сами отслеживают фактический ток и при превышении установленного значения отключают выход. Достигать искробезопасности можно двумя путями: увеличивая скорость реакции системы искрозащиты на короткое замыкание, чтобы при той же мощности искры можно было увеличить пиковое значение тока, либо ограничивая именно амплитуду этого тока на более низком уровне, но с меньшим временем реакции системы. Но проблемы возникают

именно тогда, когда пусковой ток искробезопасного оборудования, хоть и кратковременно (импульсно), но превышает максимальное значение выходного тока источника питания. В таких режимах источник обязан отключиться.

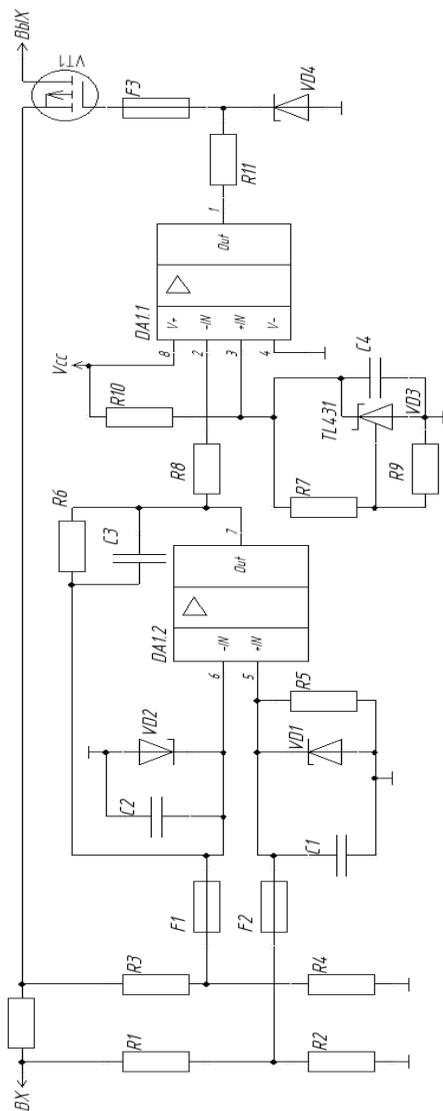


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема последовательного регулятора тока (ПРТ)

Решением этой проблемы могут являться ограничивающие цепи, которые смягчат пусковой ток. Принцип работы последовательного регулятора тока основан на запирании последовательного установленного транзистора.

Принцип работы последовательного регулятора тока схож с принципом работы параллельного токоограничения. Единственной разницей является то, что на выходе операционного усилителя DA1.1, в случае превышения током заданного значения, устанавливается не логическая единица, а логический ноль (рис. 1).

Схема ограничивает мощность, передаваемую от источника к потребителю в пусковые моменты времени. В работе такой схемы наблюдается положительная обратная связь: чем больше нагрузка пытается потребить тока, тем меньше напряжение на выходе цепи ограничения, и нагрузка, пытаясь сохранить баланс мощностей, будет пытаться удержать потребление на том же уровне и потреблять ещё больше тока. Так как ток у нас постоянен, то цепь защиты будет уменьшать именно напряжение. В теории это может привести к выключению потребителя, если напряжение опустится ниже минимально установленного. Однако импульсные токи в цепях нагрузки имеют малую длительность, а запас по диапазону входного напряжения довольно велик.

С точки зрения искрозащиты ГОСТ не допускает применения полупроводниковых компонентов для ограничения тока. Таким образом, эта цепь не может рассматриваться как узел искрозащиты или ограничительная цепь. Её установка никак не мешает работе реальных искрозащитных барьеров и только помогает им. Если доказано, что установленные ГОСТом барьеры полностью удовлетворяют требованиям, то и установка добавочных цепей возможна.

Рассмотрим этот же пусковой момент времени, только с цепью ограничения тока (рис. 2).

На рисунке явно виден момент времени, в котором достигается максимальное потребление тока. Схема не полностью отключает выход, шунтируя его на минус, а переходит в режим ограничения. Так как в цепи не предусмотрено сдвигание порогов по гистерезису, то схема работает с частотой, соответствующей собственной скорости реакции.

Как это выглядит более детально, представлено на большей развёртке на рис. 3.

**Выводы.** Предлагаемая схема может обеспечить запуск устройств, в пусковой момент времени которых имеется высокий пиковый ток. В таком режиме ток стабилизирован на значении меньшем,

чем порог срабатывания защиты источника. Однако в таком режиме происходит уменьшение выходного напряжения. Поэтому устройство должно иметь запас по минимальному рабочему напряжению.

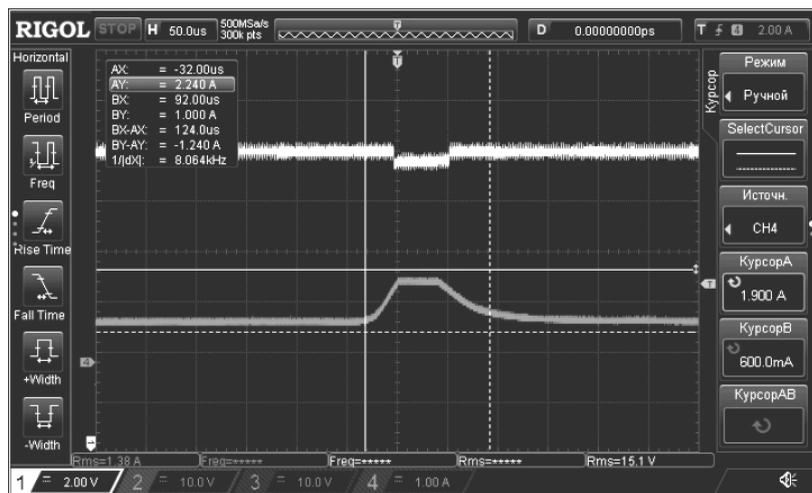


Рис. 2. Осциллограмма тока и напряжения в пусковой момент времени с целью ограничения (сверху вниз: выходное напряжение, выходной ток)

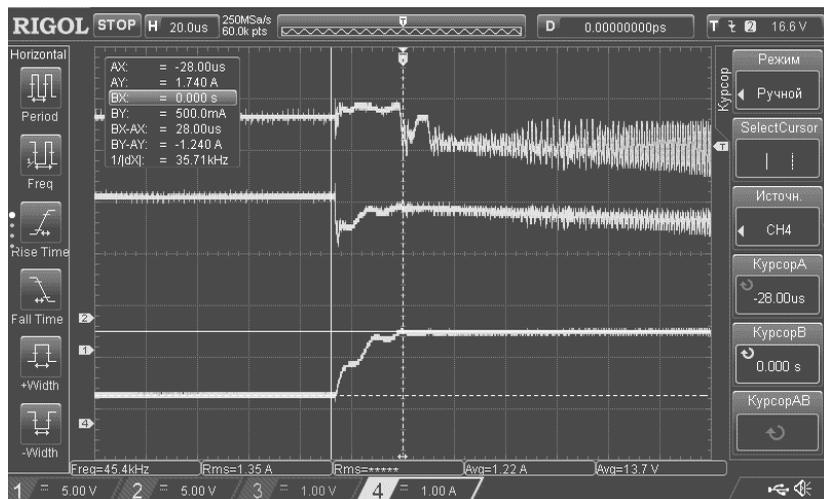


Рис. 3. Осциллограмма тока и напряжения в пусковой момент времени с целью ограничения (сверху вниз: затвор ограничительного транзистора, выходное напряжение, выходной ток)

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 31610.11–2014 (IEC 60079-11:2011). Взрывоопасные среды. – Ч. 11. Оборудование с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь «i» (дата введения 2016-12-01) [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200121999> (дата обращения: 10.21.2020).

2. Волошиновский К.И. Аппаратные и схемотехнические решения для исполнения искрозащиты и взрывозащиты, общий ход рассуждений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015 [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/apparatnyie-i-shemotekhnicheskie-resheniya-dlya-ispolneniya-iskrozashchity-i-vzryvozaschity-obshchiy-hod-rassuzhdeniy> (дата обращения: 27.11.2021).

УДК 621.314

### **ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДВУХФАЗНОГО ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ИНТЕРЛИВИНГОМ И ЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ В СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ MATLAB SIMULINK**

*А.Е. Грезева, студентка;*

*Е.О. Упорова, инженер-электроник ООО «Герц Инжиниринг»;*

*В.Д. Семенов, проф. каф. ПрЭ, к.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, [aleksandr@98@mail.ru](mailto:aleksandr@98@mail.ru)*

Представлена структурная схема двухфазного повышающего преобразователя с интерливингом, построенная на основе метода коммутационных разрывных функций, разработана имитационная модель преобразователя для ее исследования в среде моделирования MatLab Simulink.

**Ключевые слова:** двухфазный повышающий преобразователь с интерливингом, метод коммутационных разрывных функций, MatLab Simulink, частотные характеристики.

Современные компьютерные средства моделирования позволяют оценить достоверность расчетов параметров преобразователей и исследовать выбранный преобразователь без создания физического прототипа. В данной статье приведено построение имитационной модели двухфазного повышающего преобразователя с интерливингом с системой управления для дальнейшего его исследования.

Структурная схема двухфазного повышающего преобразователя с интерливингом и системой управления, составленная по методу коммутационных разрывных функций [1], представлена на рис. 1. В данной схеме повышающий преобразователь каждой фазы представлен в виде двух перемножителей выходного напряжения и тока дрос-

ся с управляющим ШИМ-сигналом  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ ,  $X_4$  для первой и второй фазы соответственно. Дроссели с индуктивностями  $L_1$  и  $L_2$  и конденсатор с ёмкостью  $C$  представлены интеграторами, а сопротивление нагрузки – преобразователем напряжения в ток.

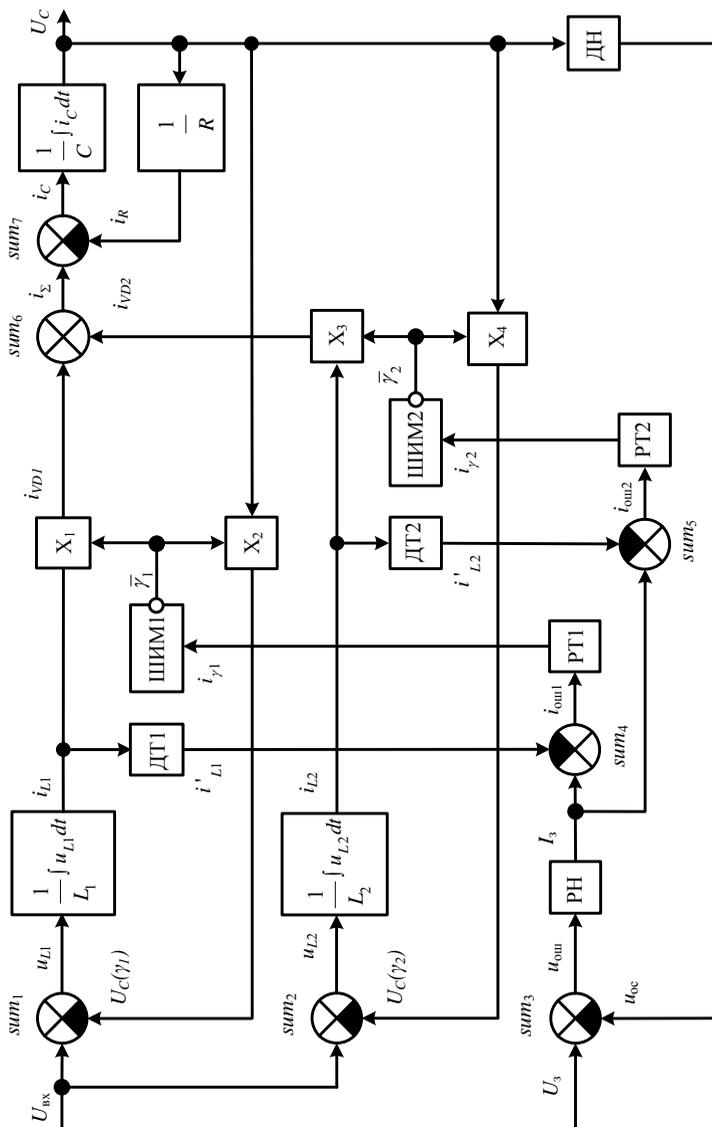


Рис. 1. Структурная схема двухфазного повышающего преобразователя

Особенностью системы управления двухфазным повышающим преобразователем с интерливингом является наличие двух контуров регулирования: внутреннего и внешнего контура. Внутренний контур представляет собой регуляторы токов дросселей  $PT1$  и  $PT2$  с датчиками токов  $DT1$  и  $DT2$ . В [2] регулирование осуществляется по максимальному входному току, что обусловлено простотой реализации. Однако при таком способе регулирования распределение токов между дросселями будет неравномерным, что может привести к увеличению потерь на них и неравномерному нагреву силовых ключей. Кроме того, при таком регулировании регулировочная характеристика внутреннего контура не линейна, а выбор корректирующего звена ограничен. Внешний контур представляет собой регулятор выходного напряжения  $PH$  с датчиком напряжения  $ДН$ .

Модель преобразователя с разомкнутыми контурами регулирования токов дросселей и выходного напряжения, построенная в среде MatLab Simulink [3], изображена на рис. 2.

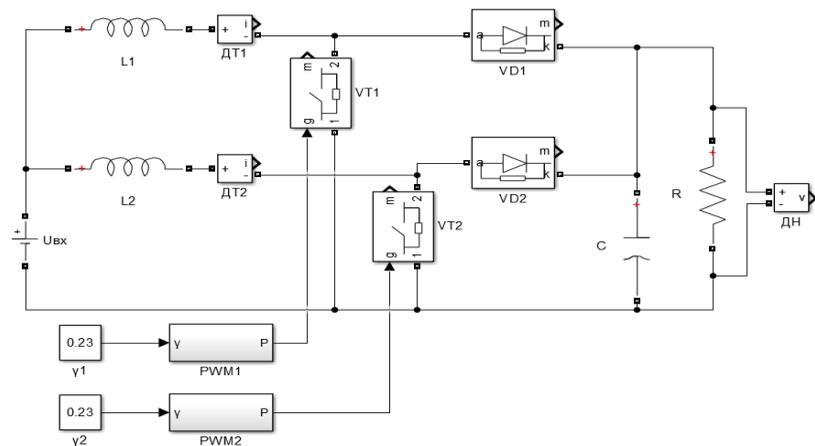


Рис. 2. Имитационная модель двухфазного повышающего преобразователя с интерливингом с разомкнутыми контурами регулирования

Полученная модель преобразователя с системой управления позволит исследовать частотные характеристики преобразователя, получить передаточные функции и подобрать корректирующие звенья для обоих контуров регулирования.

**Выводы.** В ходе работы были построены структурная схема двухфазного повышающего преобразователя с интерливингом, отражающая все его внутренние связи, и имитационная модель преобразо-

вателя с системой управления, позволяющая получить частотные характеристики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кобзев А.В. Применение метода коммутационных разрывных функций для построения математических моделей силовых преобразователей / А.В. Кобзев, В.Д. Семенов, Е.К. Фединых // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2(24), Ч. 3. – С. 58–63.
2. Шаварин Н.И., Яров В.М., Лазарева Н.М., Лях А.В., Иванов А.Л. Двухфазный повышающий конвертер с цифровым управлением // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. трудов НПП «ЭКРА». – Вып. III. – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ», 2014. – 104 с.
3. Черных И.В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем. – СПб.: ДМК-Пресс, 2008. – 400 с.

УДК 621.396.41

### РАЗРАБОТКА ИНТЕРФЕЙСА УСТРОЙСТВА ЗАРЯДА И РАЗРЯДА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ ESP32 WROVER-B

*К.И. Замира, студент каф. ПрЭ*

*Научный руководитель А.В. Осипов, доцент каф. ПрЭ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР*

Приведены результаты разработки интерфейса для устройства заряда и разряда аккумуляторной батареи на микроконтроллере ESP32 Wrover-B.

**Ключевые слова:** ESP32, микроконтроллер, аккумуляторная батарея.

Аккумуляторными батареями в электротехнике называются химические источники тока, которые пополняют и восстанавливают потраченную энергию за счет воздействия внешнего электрического поля.

Устройства, подающие электричество на пластины аккумуляторной батареи, называются зарядными, источник тока приводится в рабочее состояние и заряжает аккумуляторную батарею.

Задачей разрабатываемого устройства является создание интерфейса на основе микроконтроллера ESP32 Wrover-B.

Типов микроконтроллеров существует несколько, их отличие между собой проявляется архитектурой процессорного модуля, размерами и типом встроенной памяти, а также периферийными устройствами, типом корпуса и т.д.

Дешевые варианты памяти позволяют однократно записать данные, или программа записывается на кристалл во время изготовления.

Требования по уменьшению цены и энергопотреблению ограничивают тактовую частоту контроллеров. Производители стремятся обеспечить работу изделий на высоких частотах, в то же время предоставляют заказчикам выбор, выпуская модификации, рассчитанные на разные частоты и напряжения питания. В данном случае будет рассматриваться работа микроконтроллера ESP32 Wrover-B, на плате TTGO-T18 V2.2. Характеристики данной платы на базе ESP32 Wrover-B представлены в таблице.

**Технические характеристики ESP32 Wrover-B**

Тип	ESP32-WROVER-B
Ядро	ESP32-D0WD (Dual Core)
Wi-Fi	802.11 b/g/n (802.11n up to 150 Mbps)
BT/BLE	Bluetooth v4.2 BR/EDR and BLE specification
Стандартные интерфейсы	SD card, UART, SPI, SDIO, I2C, I2S, IR, pulse counter, GPIO, capacitive touch sensor
ADC	ADC/DAC
PWM	LED PWM, Motor PWM
Встроенные сенсоры	Емкостные сенсорные датчики, датчик Холла
Рабочее напряжение, В	3,3 (2,7 ... 3,6) (при токе до 500 мА)
Встроенная память	SPI flash... 4 Мб PSRAM... 8 Мб
Форм-фактор (две версии)	ESP32-WROVER-B (PCB) ESP32-WROVER-1B (IPEX) 38 pin, 18x31.4x3.3 мм (LCC), антенна PCB 2 дБи, либо IPEX-разъем
Диапазон рабочих температур	-40 ... +65 °C

Отличительными особенностями данной платы является возможность программирования микроконтроллера через USB, а также программируемые выводы GPIO. То есть эту плату можно использовать для изучения работы микроконтроллера ESP32 Wrover-B. Для работы с микроконтроллером с помощью Arduino IDE устанавливаются библиотеки в менеджер плат программы. Экран 1,8 дюйма подключается по протоколу SPI. Подключив экран к этим выводам и подключения библиотеки данного экрана, контролирующая плата которого является ST7735, был проделан эксперимент с выводом простых фигур на экран. После успешного подключения и вывода фигур на экран были разработаны некоторые варианты меню устройства, которые будут дальше встраиваться в блок заряда аккумуляторных батарей (рис. 1). Для того чтобы меню можно было отображать на русском языке, нужно было подключить необходимую библиотеку или самому напи-

сать функцию, которая добавляет системный русский язык в устройство. Подключение библиотеки и дальнейшее ее использование оказалось невозможным, так как её работа была некорректна. Была написана функция, которая преобразовывала текст корректно (рис. 2).

Меню		Напряжение	12.2 В
Измерение тока и напряжения аккумуляторной батареи		Ток заряда	12.3 А
Проверка сопротивления аккумуляторной батареи		Сопротивление	5.1 мОм
45°C	<input type="checkbox"/> 70%	45°C	<input type="checkbox"/> 70%
	Проверка сопротивления аккумуляторной батареи	Напряжение	12 В
Установка напряжения	12 В	Ток заряда	12 А
Установка тока	5 А	Сопротивление	5 мОм
Сопротивление аккумулятора	2,4 Ом	45°C	<input type="checkbox"/> 70%

Рис. 1. Варианты меню устройства



Рис. 2. Отображение русского языка

## ЛИТЕРАТУРА

1. Datasheet ESP Series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf), свободный (дата обращения: 10.02.2022).
2. Technical Reference Manual ESP32 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_technical\\_reference\\_manual\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf), свободный (дата обращения: 10.02.2022).
3. Datasheet ESP32-WROVER-B [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wrover-b\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wrover-b_datasheet_en.pdf), свободный (дата обращения: 10.02.2022).
4. Русификация библиотеки Adafruit-GFX и вывод русских букв на дисплей в кодировке UTF-8 из Arduino IDE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arduino.ru/forum/programirovanie/rusifikatsiya-biblioteki-adafruit-gfx-i-vyvod-russkikh-bukv-na-displei-v-kodi>, свободный (дата обращения: 10.02.2022).

## **ПОДСЕКЦИЯ 2.5**

### **ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАНОФОТОНИКА И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА**

*Председатель – Шарангович С.Н., проф.,  
зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н.;*  
*зам. председателя – Перин А.С., доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.*

УДК 621.372.81.09

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУРАХ, ФОРМИРУЕМЫХ В ПОВЕРХНОСТНО ЛЕГИРОВАННОМ КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ**

*А.Е. Александров, Ю. Новиков, магистранты каф. СВЧиКР;*

*А.Д. Безпальный, ассистент каф. СВЧиКР*

*Научный руководитель А.Е. Мандель, проф. каф. СВЧиКР  
г. Томск, ТУСУР, jiehaajiekcah6pob@gmail.com*

Приведены результаты моделирования распространения оптического излучения в волноводных структурах, формируемых в поверхностно легированном кристалле ниобата лития.

**Ключевые слова:** ниобат лития, оптический волновод, эффективный показатель преломления, распространение оптического излучения.

Кристалл ниобата лития является широко применяемым на практике материалом благодаря своим электрооптическим, нелинейно-оптическим, акустооптическим и пьезоэлектрическим свойствам [1–3]. Волноводные структуры на основе ниобата лития используются в оптических системах передачи, приема и обработки информации, в интегрально-оптических схемах, в приборах лазерной техники, нелинейной оптики и нанофотоники [2, 3]. Оптические волноводы являются фундаментальными элементами при построении различных оптоэлектронных устройств и фотонных интегральных схем [3, 4].

Целью данной работы является моделирование распространения оптического излучения в волноводных структурах, формируемых в поверхностно легированном кристалле ниобата лития.

Моделирование распространения оптического излучения проводилось для кристаллического образца ниобата лития  $X$ -среза с размерами  $1,25 \times 10 \times 14$  мм<sup>3</sup> по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соответственно. Поверхностный слой кристалла был легирован ионами меди. Толщина поверхностного слоя по оценкам, приведенным в работе [5], составила  $\sim 300$  мкм.

Расчеты по распределению световых полей проводились для волноводных структур, формируемых в кристалле ниобата лития по методике, описанной в работе [6].

Расчеты световых полей проводились для длин волн  $\lambda = 633$  нм и  $\lambda = 1310$  нм. Ширина волноводной области в расчетах не превышала 10 мкм. Изменения показателя преломления в волноводном слое возрастали на величину от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-3}$ . Для прилегающих слоев изменения показателя преломления уменьшались на величину от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $3 \cdot 10^{-3}$ . Эти данные соответствуют экспериментальным результатам изменений показателя преломления, индуцированных лазерным излучением в кристалле ниобата лития [5].

Для расчета модового состава использована методика расчета, приведенная в [7]. Число распространяемых в волноводной структуре мод  $m$  рассчитывалось из критических поперечных размеров волноводного слоя, а также из величины эффективного показателя преломления  $N_{\text{эфф}}$ . Для существования  $TE_m$ -мод в волноводных структурах с различными параметрами были определены углы ввода излучения  $\theta_m$  и условия работы волноводных структур в одномодовом режиме.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петров М.П. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике / М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко. – СПб.: Наука, 1992. – 315 с.
2. Toney J.E. Lithium niobate photonics / J.E. Toney. – Boston-London: Artech House, 2015. – 268 p.
3. Bazzan M. Optical waveguides in lithium niobate: Recent developments and applications / M. Bazzan, C. Sada // Appl. Phys. Rev. – October 2015. – Vol. 2, No. 4. – P. 040603-1–040603-25.
4. Liu Y. High-Speed Optical Transceivers. Integrated Circuits Designs and Optical Devices Techniques / Y. Liu, H. Yang; ed. by Tjan Kwang Wei. – Singapore: World Scientific Publishing, 2006. – 228 p.
5. Безпальный А.Д. Оптически индуцированные каналные волноводные структуры с пространственной модуляцией параметров в поверхностном слое ниобата лития / А.Д. Безпальный, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, В.И. Быков, К.М. Мамбетова // Известия высш. учеб. заведений. Физика. – 2019. – Т. 62, № 3. – С. 3–8.
6. Безпальный А.Д. Визуализация изменений показателя преломления, индуцированных в поверхностно легированном кристалле ниобата лития / А.Д. Безпальный, А.Е. Мандель, В.И. Быков // Электронные средства и системы

управления: матер. докл. XVII Междунар. науч.-практ. конф. (17–19 ноября 2021 г.): в 2 ч. – Ч. 1. – Томск: В-Спектр, 2021. – С. 177–179.

7. Шандаров С.М. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах / С.М. Шандаров, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, Н.И. Буримов. – Томск: ТУСУР, 2012. – 242 с.

УДК 535.212

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ И ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНЫХ СТРУКТУР В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ**

*Д.В. Кузнецов, А.А. Черный, студенты;*

*Д.В. Окунев, аспирант, ассистент каф. СВЧиКР*

*Проект ГПО СВЧиКР-2103. Исследование нелинейных преобразований световых полей в кристаллах ниобата лития  
г. Томск, ТУСУР, dima\_kuznetsov666@mail.ru*

Приведены результаты экспериментов по исследованию пропускания оптического излучения в кристалле ниобата лития во время оптического воздействия лазерным излучением. Описана методика проведения эксперимента и получены графические результаты.

**Ключевые слова:** ниобат лития, нелинейно оптический отклик, фоторефрактивный эффект.

Благодаря большим значениям электрооптических коэффициентов, ниобат лития используется для создания оптических амплитудных/фазовых модуляторов, ячеек Поккельса, модуляторов добротности для лазеров [1, 2]. Ниобат лития обладает уникальным набором физических, нелинейно оптических и фоторефрактивных свойств, благодаря которым внутри кристалла возможно формирование различных голографических структур под действием света [3, 4].

**Исследование процесса формирования неоднородностей в кристалле ниобата лития.** Для исследования фоторефрактивного эффекта, в кристалле ниобата лития были проведены последовательное индуцирование кристалла и сравнение получившихся оптических неоднородностей на различном расстоянии друг от друга.

Неоднородная структура индуцировалась фокусированным лазерным пучком на поверхность фоторефрактивного кристаллического образца  $\text{LiNbO}_3$  X-среза с размерами  $2 \times 9,8 \times 8$  мм<sup>3</sup> по осям X, Y, Z соответственно. Поверхностный слой кристалла легирован ионами железа. В качестве источников излучения использовались полупроводниковый лазер KLM-457-50 (1) с длиной волны  $\lambda = 457$  нм, полупроводниковый лазер LCS-DTL-317 (2) с длиной волны  $\lambda = 532$  нм, светоделитель (3), диафрагма (4). Световой пучок фокусировался на поверх-

ность кристалла (6) линзой (5) с фокусным расстоянием  $F = 50$  мм. Фильтр (7) не пропускает длину волны 532 нм. После фильтра был установлен фотодиод S130C (8), который снимал интенсивность излучения лазера с длиной волны  $\lambda = 457$  нм. Схема используемой установки приведена на рис. 1.

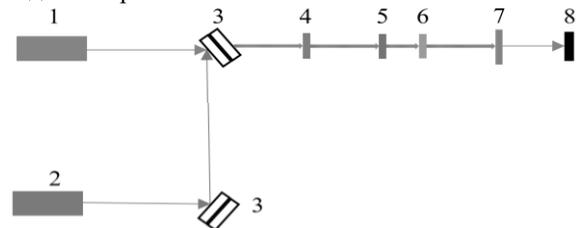


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В ходе эксперимента кристалл, фильтр и диод были установлены на трехпозиционный столик, который управлялся с помощью компьютерной программы kinesis. Трехпозиционный столик позволяет изменять положение закрепленного объекта в трех осях с точностью до нанометров и регулируемой скоростью. Для снятия мощности излучения был использован фотодиод S130C, подключенный к измерителю оптической мощности и энергии PM100D. Он управлялся специализированным программным обеспечением «Optical Power Monitor».

На входной грани кристалла ниобата лития была проведена запись вдоль оси  $X$  фокусированным лазерным пучком на расстоянии 2 мм от левой грани кристалла, диаметр пучка составлял  $d = 60$  мкм. Время записи составляло 6 мин. При засветке горизонтальной области кристалла, где производилось индуцирование несфокусированным лазерным пучком, были получены зависимости оптической мощности от времени. При этом трехпозиционный столик перемещался по горизонтальной оси  $Y$  со скоростью 0,1 мм/с.

Из полученных данных сложно получить результаты индуцирования неоднородной структуры в кристалл ниобата лития. Результаты представлены на рис. 2.

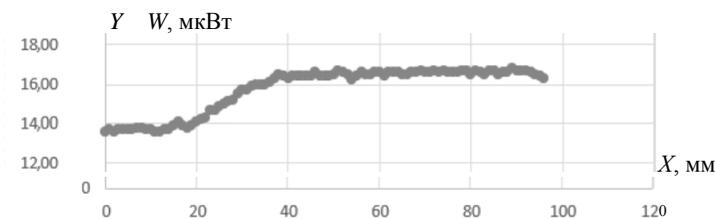


Рис. 2. График усредненной мощности

Получившиеся результаты можно списать на неровности или какие-либо повреждения на поверхности кристалла. Из полученных данных невозможно подтвердить изменение пропускания света на точке записи в кристалле.

Данным экспериментом не удалось зафиксировать изменения пропускания света в кристалле ниобата лития при записанной в него неоднородной оптической структуре. Это может быть связано со слабой интенсивностью синего лазера, который использовался для снятия данных кристалла, малой мощностью излучения, попадающего на диод, а также погрешностью измерительного прибора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шандаров В.М. Основы физической и квантовой оптики: учеб. пособие. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. – 197 с.

2. Mayer A.S. Watt-level 10-gigahertz solid-state laser enabled by self-defocusing nonlinearities in an aperiodically poled crystal / A.S. Mayer, C.R. Phillips, U. Keller // Nature communications. – 2017. – № 1. – P. 8.

3. Abouellell M.M. Waveguides in lithium niobate / M.M. Abouellell, F.J. Leonberger // Journal of the American Ceramic Society. – 1989. – № 8. – P. 1311–1321.

4. Kong Y. Recent progress in lithium niobate: optical damage, defect simulation, and on-chip devices / Y. Kong, F. Bo, W. Wang, D. Zheng, H. Liu, G. Zhang, R. Rupp, J. Xu // Advanced Materials. – 2020. – № 3. – P. 7.

УДК 535.4

### **ВЫЯВЛЕНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОГО НАПРАВЛЕНИЯ [110]\* В ОБРАЗЦЕ СИЛИКАТА ВИСМУТА СРЕЗА (110)\* МЕТОДАМИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

***В.О. Васюкевич, Н.А. Корсаков, А.М. Добрянский, студенты***

*Научный руководитель А.О. Злобин, ассистент каф. ЭП*

*г. Томск, ТУСУР, [vasukevich.v@gmail.com](mailto:vasukevich.v@gmail.com)*

Приведены результаты работы по выявлению кристаллографического направления [110] в образце силиката висмута с оптической гранью, нормальной к направлению [110].

**Ключевые слова:** силлениты, двухволновое взаимодействие, фоторефрактивный эффект.

---

\* Индексы Миллера кристаллографического направления записываются в квадратных скобках, индексы Миллера грани – в круглых. Источник: Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская. Основы кристаллофизики: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. – М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. лит.-ры, 1979. – С 90–92.

Исследование эффекта фазовой демодуляции на пропускающих голографических решётках в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  при ориентации вектора решётки  $\mathbf{K} \parallel [001]$  выявило наличие эффектов второго порядка – обратного флексоэлектрического эффекта и флексогирации, а применённая методика позволила произвести оценку связанных с этими эффектами материальных параметров кристалла [1]. Для дальнейшего исследования перспективна ориентация  $\mathbf{K} \parallel [110]$ , при которой амплитуда колебаний на удвоенной частоте модуляции в выходном сигнале стремится к нулю, а роль эффектов второго порядка становится определяющей.

В эксперименте по выявлению направления  $[110]$  использовалась установка, схема которой представлена на рис. 1.

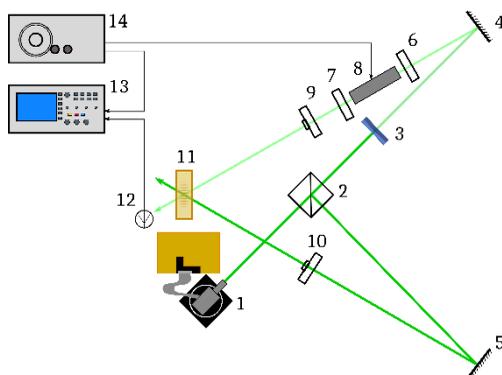


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – 532 нм полупроводниковый лазер; 2 – делительный куб; 3 – аттенюатор;
- 4, 5 – стационарные зеркала; 6, 7 – поляризаторы; 8 – электрооптический модулятор;
- 9, 10 – системы  $\lambda/4$  пластин; 11 – образец  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ;
- 12 – фотодиод BPW-34; 13 – цифровой осциллограф; 14 – генератор сигнала

Методика заключалась в следующем. Для каждого положения кристалла в пределах угла от  $87^\circ$  до  $92^\circ$  в лабораторной системе координат, где 0 соответствует направлению  $[001]$ , сильным стационарным опорным пучком и слабым фазово-модулированным сигналом формировалась динамическая голограмма. Отношение интенсивностей  $I_s/I_p$  пучков составляло 0,006, что позволяет в аналитических расчетах использовать приближение малых контрастов [2], и задавался аттенюатором 3. Оба пучка на  $\lambda/4$ -пластинах приобретали циркулярную поляризацию. Считывание динамической голографии сигнальным пучком осуществлялось с помощью фотодиода BPW-34 в фотодиодном режиме и цифрового осциллографа Tektronix TDS 2012C.

Амплитуда модуляции фазы сигнального пучка считалась пропорциональной амплитуде прикладываемого к модулятору 8 напряжения, варьировавшегося в пределах от 50 до 200 В с шагом 25 В. При каждом напряжении снималось 60 осциллограмм выходного сигнала с интервалом в 1 с.

Изменение напряжения сопровождалось пятиминутной задержкой, в течение которой переходные процессы в основном завершались.

Разложение сигнала в ряд Фурье и применение дальнейшей обработки позволили получить значения глубин модуляции на частоте первой и второй гармоник и построить участок ориентационной характеристики, приведённый на рис. 2.

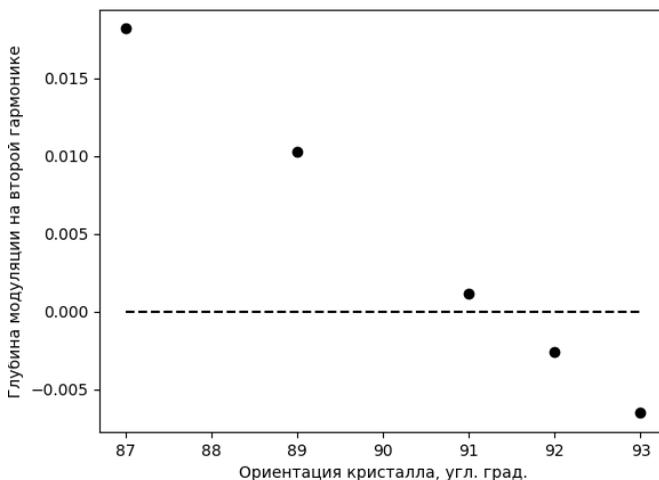


Рис. 2. Ориентационная характеристика

Из рис. 2 видно, что точка при  $91^\circ$  наилучшим образом соответствует ориентации [110].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шандаров С.М. и др. Определение материальных параметров фоторефрактивных кристаллов на основе метода адаптивной голографической интерферометрии // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129, вып. 4.
2. Фоторефрактивные эффекты в электрооптических кристаллах: монография / С.М. Шандаров, В.М. Шандаров, А.Е. Мандель, Н.И. Буримов. – Томск: Томск. Гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – 242 с.

## **ПОДСЕКЦИЯ 2.7**

### **СВЕТОДИОДЫ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА**

*Председатель – Туев В.И., зав. каф. РЭТЭМ, проф., д.т.н.;  
зам. председателя – Солдаткин В.С., доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.*

УДК 628.9.041

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ЦВЕТА СИЭ ОТ НОРМЫ В ШАГАХ МАКАДАМА**

*М.В. Андреева, ассистент каф. РЭТЭМ*

*Научный руководитель В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, [ivi\\_retem@main.tusur.ru](mailto:ivi_retem@main.tusur.ru)*

Излагаются результаты исследования отклонения цвета светодиодного излучающего элемента (СИЭ) в шагах Макадама. В результате работы установлено, что отклонения цвета в шагах Макадама для образцов СИЭ укладываются в допустимый интервал значений.

**Ключевые слова:** светодиодный излучающий элемент, гониофотометр, эллипсы Макадама, координаты цветности.

Светодиодный излучающий элемент (СИЭ) состоит из несущей конструкции, кристаллов и люминофора. В качестве материала несущей конструкции выступают керамика, сапфир или металл. Далее на основание устанавливаются кристаллы синего цвета свечения методом COB (Chip on Board). Мощность данного СИЭ составляет от 0,5 до 2 Вт. Обычно располагают 28–30 кристаллов, соединенных последовательно [1].

Целью данной работы является исследование отклонения цвета СИЭ от нормы в шагах Макадама.

Эллипс Макадама показывает, как светодиоды, принадлежащие определенной производственной линии, отклоняются от стандартных значений в своей цветовой согласованности. Благодаря эллипсам Макадама можно увидеть, насколько светодиоды отличаются от стандартных значений по точности цветопередачи [2, 3].

Для проведения измерений использовался гониофотометр. Это прибор, который используется для измерения света, излучаемого объектом при различных углах. В данный прибор встроен датчик угла поворота в горизонтальной плоскости, который регистрирует угловое перемещение платформы вместе с закреплённым на ней источником.

Базовая комплектация установки позволяет выполнить подавляющее большинство типовых фотометрических измерений, которые необходимы для оценки параметров осветительных приборов при дальнейшей разработке светотехнических изделий [4].

СИЭ устанавливался на гониофотометре горизонтально. В результате были измерены 3 образца светодиодного излучающего элемента (рис. 1).

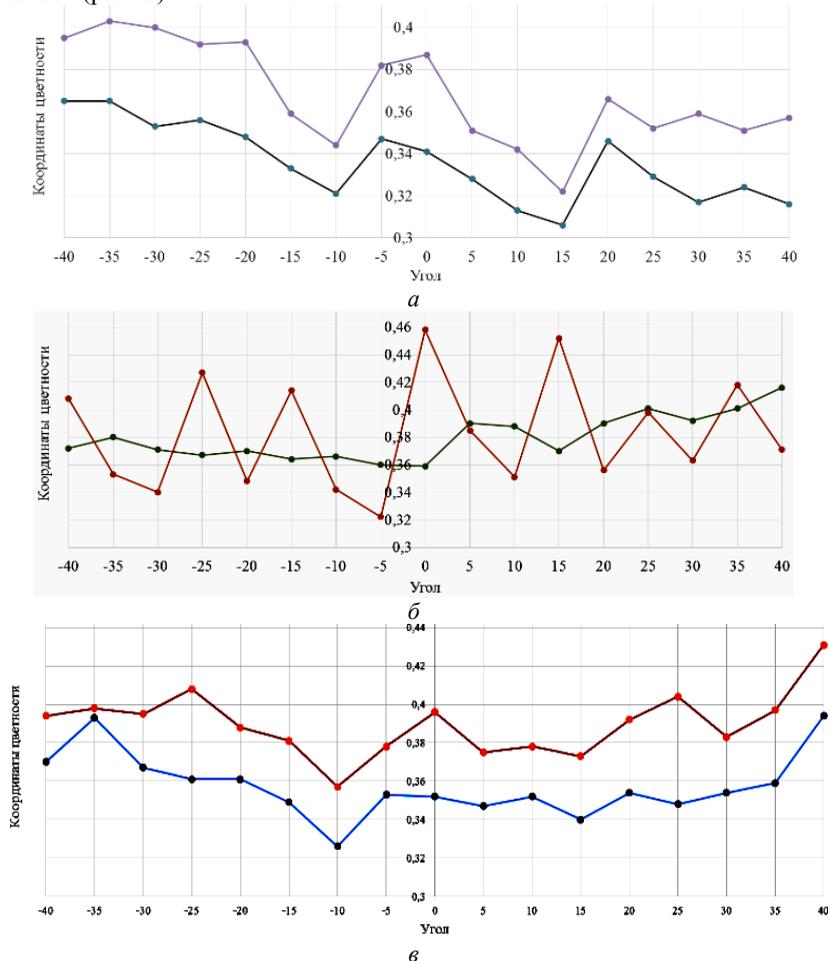


Рис. 1. Координаты цветности образца:  
 $a$  – № 1 (кривая  $X$  – черная, кривая  $Y$  – фиолетовая);  
 $б$  – № 2 (кривая  $X$  – оранжевая, кривая  $Y$  – зеленая);  
 $в$  – № 3 (кривая  $X$  – синяя, кривая  $Y$  – красная)

На основе формулы (1) были рассчитаны значения отклонения цвета от нормы в шагах МакАдама. Результаты приведены в таблице.

$$n = \frac{\sqrt{(u' - u'_c)^2 + (v' - v'_c)^2}}{0,0011}. \quad (1)$$

где  $n$  – отклонение цвета рассматриваемого ОП от номинального значения в шагах МакАдама;  $u'$ ,  $v'$  – координаты цветности рассматриваемого ОП в колориметрической системе МКО 1976 года;  $u'_c$ ,  $v'_c$  – координаты цветности номинальной КЦТ в колориметрической системе МКО 1976 г.

Перевод координат цветности колориметрической системы МКО 1931 г. ( $x$ ,  $y$ ) в систему МКО 1976 г. ( $u'_c$ ,  $v'_c$ ) производится по следующим формулам:

$$u'_c = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \quad (2)$$

$$v'_c = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}. \quad (3)$$

**Отклонение цвета от нормы в шагах МакАдама**

№ образца	Отклонение цвета в шагах МакАдама
1	5
2	4
3	6

Значения отклонения цвета от нормы должны укладываться в интервал от 3 до 7. Как видно по таблице, все образцы удовлетворяют данным значениям.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Стасенко Ю.И., Андреева М.В., Юлаева Ю.В. Исследование кривой силы света светодиодных ламп общего назначения // Научная сессия ТУСУР–2019: матер. междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 22–24 мая 2019 г.: в 4 ч. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 2. – С. 44–47.
2. Что такое эллипс МакАдама? [Электронный ресурс]. – Режим доступа. – <https://svetorezerv.ru/news/chto-takoe-ellips-makadama> (дата обращения: 07.03.2022).
3. MacAdam, David Lewis. Visual sensitivities to color differences in daylight (abstract) // Journal of the Optical Society of America. – 1942. – Vol. 32, Iss. 5. – P. 247–274.
4. Фотометрическое оборудование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://goniometer.su/?yclid=894075711506898144> (дата обращения: 08.03.2022).

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОСВЕЩЕНИЯ ВОДНЫХ ПУТЕЙ**

*А.А. Егорова, студентка, каф. ОМ ИШНПТ*

*г. Томск, НИ ТПУ, aae42@tpu.ru*

*Научный руководитель С.Б. Туранов, доцент каф. ОМ ИШНПТ, к.т.н.*

*г. Томск, НИ ТПУ, turanov\_sb@tpu.ru*

Представлены результаты разработки светового прибора для навигационного освещения водных путей. Предложено использование вторичной оптики и солнечных панелей, а также обсуждаются результаты проектирования печатной платы и макетирования светового прибора.

**Ключевые слова:** речной светильник направленного действия, светодиоды, солнечная панель, навигационное освещение, интеллектуальная система освещения.

Состояние навигационного освещения для внутренних гидрофитных маршрутов специализировано для навигационно-гидрографического снабжения безопасных условий плавания. Содержание судходной обстановки, а именно навигационного оборудования, заключается в проведении комплекса работ по выставлению и обслуживанию навигационных знаков и огней, а также информации для судоводителей о состоянии и изменении путевых условий [1, 2].

На территории Российской Федерации для речного судоходства используется больше 100 тыс. км внутренних водных путей. Из них, на данный момент, 61,5 тыс. км имеют обслуживание системой средств навигационного оборудования, которая обеспечивает безопасность судоходства, включающего около 50 тыс. береговых навигационных знаков [3]. За последние 20 лет на территории Российской Федерации произошло значительное уменьшение протяженности водных путей, обслуживаемых навигационным оборудованием [4–6].

Исходя из перечня правил по конструированию и сборке корпусов и выбору специализированной оптики [7, 8], можно выделить основные недостатки существующего навигационного освещения: низкая работоспособность технического оборудования, а также малое использование технологий GPS-навигации и альтернативных источников питания (солнечные панели). Решение указанных недостатков является основной задачей при проектировании современных световых приборов навигационного освещения.

На основе поставленных задач был разработан корпус светового прибора с 4 источниками света, согласованными со вторичной опти-

кой (линзами из полиметилметакрилата). В корпус интегрирована солнечная батарея 145×145 мм с углом наклона 30°. Выбранный наклон обеспечивает поступление света для солнечной батареи во всей северной широте РФ. Установлены отверстия для GPS-навигации (антенны), а также выделены места для системы движения светового прибора на 180° вокруг своей нижней оси. 3D-модель корпуса представлена на рис. 1.

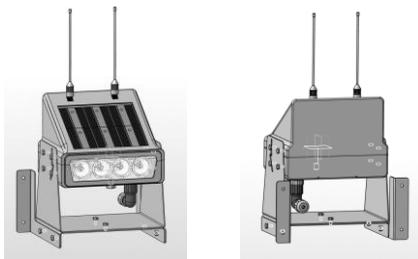


Рис. 1. Сборка полного речного огня направленного действия в ПО «КОМПАС-3D»

Для подключения светодиодов была разработана принципиальная схема печатной платы, представленная на рис. 2. Плата имеет переключки в виде резисторов с сопротивлением 0R. В будущем будет применяться дополнительная плата с функцией программного модуля и GPS-навигацией, чтобы управлять светильником на расстоянии 5 км от места установки.

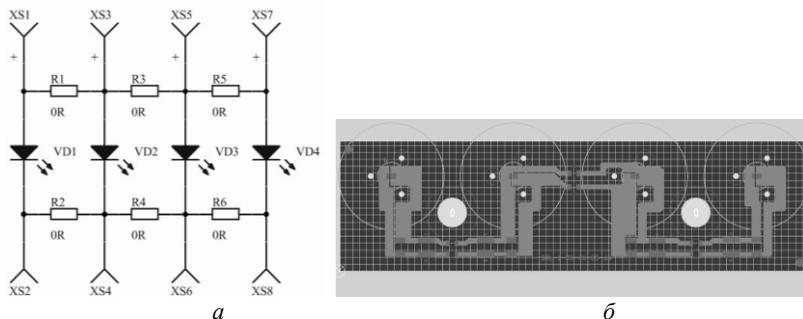


Рис. 2. Плата подключения источников света: а – схема подключения, б – разведенная плата в 2D-варианте

Также был изготовлен макет разрабатываемого прибора методом 3D-печати (рис. 3). Для апробации разработанной конструкции необходимы длительные испытания макета в реальных условиях (на реках Томской обл.), что является целью следующего этапа данного проекта.



Рис. 3. Макет светового прибора для освещения водных путей

Автор выражает благодарность Научно-исследовательскому институту полупроводниковых приборов и Томскому государственному университету систем управления и радиоэлектроники за помощь в реализации проекта и технические консультации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гладков Г.Л., Ребковец А.В. Развитие навигационного оборудования внутренних водных путей // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2012. – № 1 (13).

2. Средства навигационного оборудования ВВП и судоходства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.amurvodput.ru/vodnye-puti/putevye-raboty-0>, свободный (дата обращения: 9.01.2022).

3. Рудых С.В. Исследование судоходной обстановки ГБУ «Волго-Балт» // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2012. – № 4 (16).

4. Курбатова Е.С. Организационно-экономические предпосылки и условия эффективного использования речного транспорта в системе транспортных коммуникаций России: дис. ... канд. экон. наук. – 2019. – № 08.00. – 144 с.

5. Галин А.В. Внутренние водные пути России как часть транспортной инфраструктуры страны // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2014. – № 1 (23).

6. Олерский В.А. Состояние и перспективы развития внутренних водных путей России // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2017. – № 4 (71).

7. ГОСТ 26600–98. Знаки навигационные внутренних судоходных путей: утв. постановлением Государственного комитета РФ по стандартизации и метрологии от 14 декабря 1999 г. № 512-ст; межгосударственный стандарт ГОСТ 26600–98: введен в действие в качестве государственного стандарта РФ с 1 июля 2000 г.

8. Шкандина Ю.В. Имплантация интракорнеальных полимерных линз на основе гидроксипропилметакрилата и олигоуретанметакрилата (экспериментально-морфологическое исследование): дис. ... канд. мед. наук. – М., 2017.

## **ИНКУБАТОР ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ КУР В ДОМАШНИХ УСЛОВИЯХ**

*М.Х. Фам, студент каф. РЭТЭМ*

*Научный руководитель В.С. Солдаткин, доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, phamalyona11@mail.ru*

Излагаются результаты аналитического обзора и проектирования инкубатора для выращивания кур в домашних условиях.

**Ключевые слова:** инкубатор для выращивания кур в домашних условиях, освещение, обогрев, влажность, управление.

Целью работы является создание энергоэффективного и автономного инкубатора для выращивания кур в домашних условиях.

Задачи:

- провести аналитический обзор современных технических решений;
- провести патентный поиск;
- разработать техническое решения по созданию энергоэффективного и автономного инкубатора для выращивания кур в домашних условиях.

На сегодняшний день выращивание кур является популярным направлением сельского хозяйства. Для содержания и выращивания кур в домашних условиях требуется создать оптимальный климат.

Для создания оптимального условия содержания птиц нужно учитывать освещенность, температуру, влажность.

Свет имеет большое значение в жизнеобеспечении птиц, ведь это влияет на их рост и развитие.

На состояние иммунной системы, продуктивность и физиологию птиц влияют различные цвета. Белый свет благоприятно влияет на яйценоскость кур. Красный свет способствует увеличению привеса, а также уменьшению яйценоскости. Оранжевый свет ускоряет половое созревание у кур. У цыплят сине-зелёный свет вызывает сильное развитие. Синий свет оказывает успокаивающее воздействие и предотвращает агрессивное поведение [6].

В домашних условиях можно с помощью искусственного освещения создать требуемый режим освещенности, которая будет близка к продолжительности светового дня. Например, в первые 3 дня жизни цыплят освещенность должна быть примерно от 40 до 60 лк, а в остальные дни постепенно снижаться [3]. В качестве искусственного источника света можно использовать светодиод. Светодиодное освещение имеет много достоинств, таких как высокий срок службы более

80 000 ч, световая отдача более 120 лм/Вт [1, 2], а также это экономический источник света, позволяющий добиться требуемой освещенности с минимальными энергозатратами. Одним из путей снижения энергозатрат является использование прерывистого режима [5].

Помимо света, для цыплят в первые недели жизни необходимо и тепло. Нормальный рост новорожденных цыплят достигается за счет обеспечения температурного режима. Температурные показатели для содержания цыплят непостоянны, они меняются в сторону понижения. Например, в первые пять дней температура воздуха в помещении должна быть примерно 26–24 °С, а в последующие дни постепенно уменьшаться.

Существует много способов создания и поддержания необходимой температуры, одним из которых является ИК-обогрев. ИК-излучение не нагревает воздушную массу, поскольку тепло выделяется только на поверхностях, куда падают эти лучи (птица, подстилка и т.д.) [4].

Также немаловажна и влажность воздуха для обеспечения комфорта цыплята. Необходимая влажность уменьшает риск развития обезвоживания и респираторных заболеваний.

Таким образом, для разработки инкубатора для выращивания кур нужно учитывать температуру, влажность и освещенность, чтобы создать благоприятные условия. Так, в конструкции инкубатора в качестве освещения будут использованы светодиоды, в качестве обогрева будет устройство с ИК-излучением. Также в конструкции будут присутствовать терморегулятор и регулятор освещенности.

Вывод: были проведены аналитический обзор и проектирование инкубатора для выращивания кур в домашних условиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вилисов А., Калугин К., Солдаткин В., Перминова Е. Белые светодиоды // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – Т. 4, № 18. – С. 14–17.
2. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов / В.С. Солдаткин, Ю.В. Ряполова, К.Н. Афонин и др. // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3(37). – С. 55–61.
3. Использование светодиодных систем освещения в сельском хозяйстве: животноводстве и птицеводстве [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://eti.su/articles/svetotehnika/svetotehnika\\_1324.html](https://eti.su/articles/svetotehnika/svetotehnika_1324.html).
4. Скляр А., Постнова М. Инфракрасный обогрев в системах микроклимата птичников // Вестник ВолГУ. – Сер. 11: Естественные науки. – 2018. – Т. 8, № 2. – С. 29–31.
5. Электронный ресурс. – Режим доступа: <https://diode-system.com/kakim-dolzno-byt-osveshchenie-v-ptichnike.html>

6. Стрельников В., Краснопахтова Л. Влияние цветового восприятия освещенности на продуктивность и экологически безопасную продукцию птицы // Научный журнал КубГАУ. – 2019.

7. Шнайдер Е.В., Егорова Е.Л., Фам М.Х., Мазеина А.А. Светодиодное устройство с ИК-обогревателем для животноводства // Наука и практика: проектная деятельность – от идеи до внедрения: матер. X регион. науч.-практ. конф. – Томск, 2021.

УДК 628.931

## СВЕТОДИОДНЫЙ ИЗЛУЧАЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ

*И.В. Кузнецов, студент*

*Научный руководитель В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.  
Проект ГПО РЭТЭМ-2202. Разработка технологии получения  
высокотеплопроводящих покрытий  
г. Томск, ТУСУР, kuznetsov.i.230-3@e.tusur.ru*

Светодиодные излучающие элементы нашли широкое применение в современном мире. Их главным достоинством является большой срок службы, экономичность и экологическая безопасность. Несмотря на все преимущества, у светодиодов есть недостаток, как и у многих полупроводниковых приборов, – перегрев. Для достижения цели проводится патентное исследование по классу МПК F21S 8/00.  
**Ключевые слова:** светодиод, теплопроводность, теплопередача.

Как известно [1], у светодиодных излучающих элементов высокая длительность эксплуатации, которая составляет около 50 000 ч, но на срок службы влияет температура активной области светодиодного кристалла, которая зависит от способности конструкции светоизлучающего элемента отводить тепло и от температуры окружающей среды.

Для оптимальной работы светодиодных устройств необходимо обеспечить температуру не более 80 °С, так как при температуре 80 °С интенсивность свечения падает на 15% в сравнении с интенсивностью при комнатной температуре, а при температуре в 150 °С интенсивность света может упасть на 40%, необходимо реализовать качественный теплоотвод [1].

При расчёте температуры активную область светодиодного кристалла можно корректно оценить с помощью кинетики спектров электролюминесценции [2].

Целью данной работы является разработка конструкции светодиодного излучающего элемента с более высокой теплопроводностью.

Первым этапом ГПО является поиск патентной документации по классу МПК F21S 8/00 на глубину поиска 10 лет.

Для исследования был выбран ресурс ФИПС, на котором найдено около 125 существующих патентов. Из всех патентов было отобрано 3, подходящих для решения проблемы. Далее необходимо на основе изученных данных разработать собственную конструкцию светодиодного излучающего элемента, которая будет решать проблему теплоотвода.

Первый патент содержит в себе филаментную светодиодную лампу, содержащую в себе светодиодную ленту. Техническим результатом является обеспечение высокой равномерности излучения, благодаря светодиодной ленте в виде двух конусообразных спиралей. Светодиодная лампа содержит колбу из светопропускающего материала с цоколем, а также расположенные внутри колбы стержневой держатель, ориентированный в направлении продольной оси светодиодной лампы, и спиралевидную светодиодную ленту, витки которой расположены вокруг стержневого держателя и распределены по его высоте [3]. На рис. 1 изображена светодиодная лампа: 1 – колба; 2 – цоколь; 3 – стойка сердечника; 4 – стержневой держатель; 5 – светодиодная лента; 6 и 7 – светодиодные элементы.

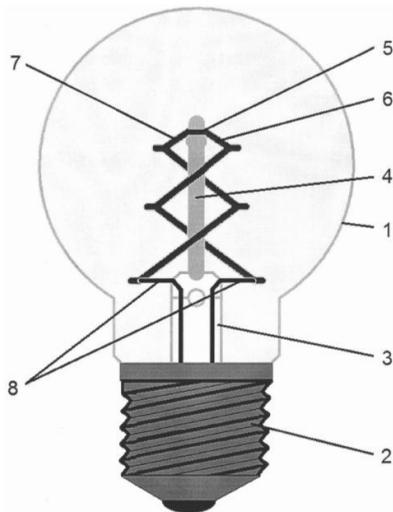


Рис. 1. Светодиодная лампа с двумя конусообразными спиральями

Второй патент содержит в себе светильник с датчиком движения. Техническим результатом является повышение надежности за счёт улучшения теплоотвода, благодаря упрощению конструкции с по-

мощью узла из двух опор-радиаторов в виде теплоотводящего профиля. Материалом для теплоотводящего элемента является алюминий.

Светильник содержит светопрозрачный корпус в форме трубки с торцевыми крышками, снабженный элементами крепления для подвешивания, расположенную в корпусе удлиненную плату со светодиодами, несущий узел из двух одинаковых опор-радиаторов, каждая в виде удлиненного теплоотводящего профиля С-образного сечения, с участком, изогнутым по дуге окружности, радиус которой соответствует внутреннему радиусу корпуса, являющегося теплоотводящим элементом, и с участком, ориентированным по радиусу указанной дуги окружности, окончание которого снабжено двумя полками с образованием паза. Опоры-радиаторы размещены в корпусе зеркально-симметрично, а в оппозитно расположенных продольных пазах опор-радиаторов горизонтально враспор установлена плата со светодиодами, поверхности участков опор-радиаторов, ориентированные по радиусу, обращенные к светодиодам, выполнены зеркально отражающими либо диффузно отражающими и являются элементами формирования светового потока [4]. На рис. 2 представлен данный светильник: 1 – корпус в форме трубки; 2 – элемент крепления; 3 – хомуты для подвешивания; 4 – опора-радиатор; 5 – плата со светодиодами; 6 – дополнительная плата с датчиком движения; 7 – система питания.

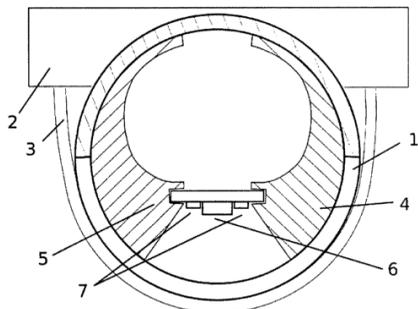


Рис. 2. Светильник с датчиком движения

Третий патент содержит в себе светильник для улиц и дорог светодиодный, содержащий светодиодные матрицы, охладитель, отражатель в виде комбинации зеркал и экрана, полимерные защитные стекла и источник питания. Светодиодные матрицы установлены на охладитель, источник питания в виде печатной платы установлен в верхней части охладителя. Сами светодиодные матрицы состоят из параллельных ветвей, в каждой ветви кристаллы соединены последовательно, все матрицы также соединены последовательно и подключены к

двум выходным выводам источника питания, отличающимся тем, что охладитель снабжен элементами для установки на световую опору в вертикальном положении как ребер, так и его плоскости, светодиодные матрицы размещены горизонтально в один ряд, отражатель составлен из семи плоских зеркал, из которых два помещены на плоскость охладителя, три установлены под наклоном к ней и еще два зеркала прикреплены снизу перпендикулярно плоскости охладителя, образуя экран в форме буквы V, ширина экрана в направлении линии сгиба увеличивается книзу, на защитных стеклах с внешней стороны светильника имеется покрытие, непрозрачное для ультрафиолетовых компонентов солнечной радиации. Главной целью является обеспечить достойное охлаждение светодиодной ленты. Это достигается с помощью оребренного корпуса, выполняющего функцию охладителя [5].

Исходя из всего вышесказанного, можно предположить примерные материалы и технологии изготовления собственной конструкции светоизлучающего элемента.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Эффективные решения для теплоотвода в светодиодной светотехнике [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ostec-materials.ru/knowledge-base/pub/detail/effektivnye-resheniya-dlya-teplootvoda-v-svetodiodnoy-svetotekhnike/>, свободный (дата обращения: 05.03.2022).

2. Луценко Е.В. Температура перегрева активной области коммерческих светодиодов и светодиодов с прямым жидкостным охлаждением чипа // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – Т. 2, № 10. – С. 26–29.

3. Пат. 2 686 156 РФ, МПК F 21 S 8/00. Светодиодная лампа / Ю.Н. Зельдин (РФ). – № 2 018 109 304; заявл: 15.03.18; опубл. 24.04.19, Бюл. № 12. – 7 с.

4. Пат. 2 762 351 РФ, МПК F 21 S 8/00. Светильник / В.А. Тихонов (РФ). – № 2 021 109 906; заявл: 09.04.21; опубл. 20.12.21, Бюл. № 35. – 7 с.

5. Пат. 2 733 513 РФ, МПК F 21 S 8/00. Светильник для улиц и дорог светодиодный / М. А. Альшутлер (РФ). – № 2 019 145 224; заявл: 25.12.19; опубл. 05.10.20, Бюл. № 28. – 13 с.

УДК 628.9.03

#### ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА В ОБЛАСТИ СВЕТОТЕХНИКИ ДЛЯ РАСТЕНИЙ

*Д.Б. Тудупова, А.А. Максименко, магистранты каф. РЭТЭМ  
Научный руководитель В.С. Солдаткин, доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, soldatkinvs@main.tusur.ru*

Показана актуальность использования цифрового двойника в области светотехники для растений. Рассмотрены преимущества использования данной технологии для развития сельскохозяйствен-

ной деятельности. Также представлена концепция построения цифрового двойника облучателей для растений.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, светотехника, преимущества цифрового двойника, облучатели для растений.

Цифровой двойник – это виртуальная модель любых объектов, систем, процессов или людей. Он необходим для имитации того, что происходит с оригиналом при определенных условиях. Выполняет множество задач, одной из которых является обнаружение проблемы или уязвимости до начала производства или ввода в эксплуатацию.

С помощью данной технологии ускорилось тестирование, улучшилась аналитика, сократились расходы на проверку работоспособности в разных условиях. В этом и заключается актуальность использования цифрового двойника [1].

Данная технология активно развивается и внедряется в любые сферы производства. В настоящее время актуальность развития сельскохозяйственной деятельности не теряет обороты. Разрабатываются новые технологии для увеличения урожайности. Светотехника является одной из лидирующих на сегодняшний день. Существует множество установок для досветки и облучения растений и семян. Технология цифрового двойника позволит улучшить и ускорить развитие техники в данном направлении.

Облучатели для растений способны пробуждать внутренние биологические процессы, что запускает активный рост и развитие растений. Тем самым повышается процент всхожести растений и соответственно увеличивается урожайность. Данный процесс возможен только при правильно подобранной дозе и времени облучения.

Поверхностная доза облучения (экспозиция) ( $H$ ) мДж/м<sup>2</sup>, определяется по формуле

$$H = E \times t,$$

где  $E$  – облучённость поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  $t$  – времени облучения, с [2].

Целевой функцией цифрового двойника ультрафиолетового облучателя является определение уровня облученности, Вт/м<sup>2</sup>.

Облученность поверхности – это световой поток, падающий на единицу площади освещаемой поверхности. Поверхностная доза напрямую зависит от уровня облученности. Чем выше показатель облученности, тем выше поверхностная доза облучения. Получение данных об уровне облученности предусмотрено с помощью датчиков.

Датчик облученности позволяет определять и выводить данные уровня облученности на интерфейс.

Устройство должно иметь Wi-Fi-модуль для отправки данных.

Целевая функция позволяет вовремя обнаружить проблемы или уязвимость во время эксплуатации прибора.

В состав комплекса управления входят микроконтроллер и датчик облученности.

В целевой функции указано, что устройство должно определять уровень облученности в люксах для наблюдения отклонения значений от допустимых пределов.

Это достигается следующим образом.

В качестве микроконтроллера используется любой универсальный микроконтроллер. Дисплей отображается на ЖК-экране. Переменный резистор R1 необходим для регулировки контрастности значков на дисплее. Вращая двигатель этого резистора, получаем самые четкие показания на экране. Подсветка включается через резистор R2, который ограничивает ток. Чем выше номинальное значение, тем слабее светится дисплей. Однако нет необходимости пренебрегать этим сопротивлением, чтобы избежать повреждения подсветки. Сам дисплей подключен к микроконтроллеру через 4-разрядную схему. Резистор R3 необходим для предотвращения самопроизвольной перезагрузки микроконтроллера в случае случайных помех на выводе РС6. Резистор R4 притягивает плюс источника питания к этому контакту и надежно создает потенциал. Сопротивление R5 ограничено.

Датчик предоставляет информацию об облучении в единицах Вт/м<sup>2</sup>.

Таким образом, с помощью технологии цифрового двойника будут вовремя предотвращены отклонения значений облученности от допустимых пределов. Тем самым уровень поверхностной облученности будет сохраняться в допустимых пределах, что способствует стабильному положительному влиянию облучения на семена растений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кокорев Д.С. Цифровые двойники: концепции, типы и преимущества для бизнеса / Д.С. Кокорев, А.А. Юрин. – М., 2019. – 34 с.
2. Тудупова Д.Б. Влияние дозы ультрафиолетового облучения на всхожесть семян травянистых растений / Д.Б. Тудупова, В.С. Солдаткин, А.О. Шардина, // Электронные средства и системы управления, 18–20 ноября 2020 г. – Томск: ТУСУР. – Т. 1. – С. 246–247.
3. Патент на полезную модель 142 430 U1 Российская Федерация, МПК А01С 1/00. Устройство предпосевной обработки семян: 2013148152/13, заявл. 29.10.2013; опубл. 27.06.2014 / Е.А. Васенев, В.Ю. Романов, Д.А. Корепанов, А.В. Бывальцев.
4. Петров А.В. Имитация как основа технологий цифровых двойников // Вестник Иркут. гос. технического ун-та. – 2018. – Т. 22. – С. 56–66.
5. Туев В.И., Незнамова Е.Г., Солдаткин В.С., Хомяков А.Ю. Применение светодиодного освещения на разных стадиях выращивания культурных растений // Сборник науч. статей 2-й Междунар. науч.-практ. конф. «Физика и технология наноматериалов и структур», 24–26 ноября 2015 г. ФГБОУ ВО

«Юго-Западный государственный университет». – Курск: Университетская книга, 2015. – Т. 2. – С. 155–160.

6. Солдаткин В.С., Ряполова Ю.В., Афонин К.Н., Олисовец А.Ю., Туев В.И. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 3(37). – С. 51–61.

7. Туев В.И., Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Солдаткин В.С. Многоуровневая компьютерная модель технологического процесса производства светодиодных ламп // Научоёмкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 86–98. DOI: 10.24411/2409-5419-2018-10228.

УДК 621.45.034.36

## **РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ ФОРСУНКА ДЛЯ АЭРОЗОЛЬНОГО ПРИНТЕРА**

***В.Д. Микеладзе, студент***

*Научный руководитель В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, проф. д.т.н.*

*Проект ГПО РЭТЭМ-2202. Разработка технологии получения*

*высокотеплопроводящих покрытий*

*г. Томск, ТУСУР, vahtangmikeladze7@gmail.com*

Изобретение относится к средствам распыливания жидкостей, растворов. Проведены патентные исследования по классу В05В 17/00, найдено 2 патента на изобретение, приведены краткие сведения.

**Ключевые слова:** аэрозольный принтер, вихревая форсунка, распылитель жидкости, патентный поиск.

При выполнении какого-либо проекта перед студентом ставится цель усовершенствовать или модернизировать механизм, оборудование. Это возможно только после патентного поиска изучения предшествующего опыта и изучения предшествующих конструкций данного изобретения. Наилучший результат дает проведение патентного поиска. Этот поиск позволяет создать что-то новое или доработать уже существующую модель.

Целью данной работы является разработка конструкторской документации для изготовления макета аэрозольного 3D-принтера.

Для курса ГПО были проведены патентные исследования для дальнейшего патентования конструкции аэрозольного 3D-принтера.

Суть работы заключается в исследовании существующих патентов распылительных форсунок, выяснении их недостатков и улучшении данной конструкции.

Патентная документация является наибольшим сборником сведений и технических решений о проекте за последние годы.

Патентная документация отличается от какой-либо другой информации следующим:

- Патентная документация содержит полную информацию о техническом изделии.
- Имеет полное описание сущности технического решения.
- В патенте содержится достоверная информация, так как патент проверяется комиссией.

В результате патентного поиска нашлось несколько патентов форсунок, подходящие под наши требования.

**Вихревая форсунка.** Автор изобретения – Олег Савельевич Кочетков, форсунка представлена на рис. 1, где 1 – корпус, 2 – цилиндрическая гильза, 3 – центральное отверстие, 4 – расширительная камера, 5 – внутренняя резьба, 6 – сопло, 7 – днище, 8 – центральное отверстие, 9, 10 – цилиндрические отверстия, 11 – смесительная камера, 12 – диффузорная выходная камера, 13 – спицы, 14 – тело вращения, 15 – диффузор, 16 – ось, 17 – резонансные выемки, 18 – кольца треугольного профиля, 19 – резонансная пластина, 20 – цилиндрическая обечайка.

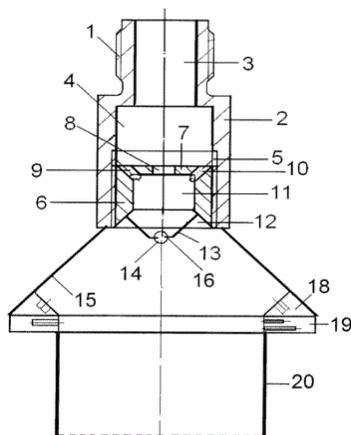


Рис. 1. Чертеж вихревой форсунки для распыления жидкости

Другим найденным патентом является **форсунка для получения порошка** распылением металлического расплава (рис. 2), где 1 – корпус; 2 – сопло; 3 – воронка; 4 – металлопровод; 5 – коллекторная плоскость; 6 – кольцевая перегородка; 7, 8 – токоподводы.

Авторы изобретения – В.М. Блехеров, В.Г. Голубков, М.Ш. Вайнмахер, А.Л. Коновалов, М.В. Мехайлов, С.Г. Сапрыкина, М.С. Дубровин, М.Р. Игумнов.

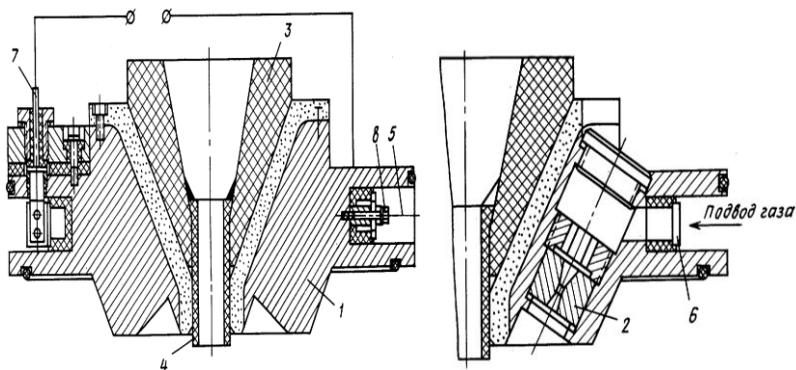


Рис. 2. Чертеж форсунки для получения порошка

Таким образом, в ходе данной работы мы провели патентный поиск жидкостных распылительных устройств (форсунок). Дальнейшее исследование направлено на улучшение, изготовление и проведение испытаний макетов распылительных устройств.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2 669 225 РФ, МПК В05В 17/06/. Форсунка вихревая / О.С. Кочетков (РФ). – № 2017138397; заявл. 03.11.2017; опубл. 09.10.2018, Бюл. № 28. – 3 с.
2. А.с. 528943 СССР. Форсунка для получения порошка распылением металлического расплава / В.М. Блехеров, В.Г. Голубков, М.Ш. Вайнмахер, А.Л. Коновалов, М.В. Мехайлов, С.Г. Сапрыкина, М.С. Дубровин, М.Р. Игумнов (СССР). – № 2148483/01; заявл. 16.06.75; опубл. 25.09.76, Бюл. № 35. – 3 с.

УДК 53.088.3

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ОЧИСТКУ ПОВЕРХНОСТИ ПОДЛОЖКИ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

*И.Д. Шарифов, аспирант каф. РЭТЭМ*

*Научный руководитель В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, д.т.н.*

*г. Томск, ТУСУР, sh\_ilhom.j@mail.ru*

Исследовано влияние плазменной обработки поверхности подложки на качество 3D-печати. Качество печати оценивали по ширине линий с помощью оптического интерференционного метода. Статистическая обработка результатов измерений подтвердила эффективность плазменной очистки для подготовки поверхности подложки к струйной 3D-печати.

**Ключевые слова:** плазменная обработка, оптический метод, принтерная печать, однофакторный дисперсионный анализ.

Актуальным направлением технической науки сегодня является разработка и совершенствование технологий струйной 3D-печати. Струйная печать применяется для решения широкого спектра научных и прикладных задач. В зависимости от конкретной задачи используются различные материалы и технологии получения трехмерного изображения [1–3]. Качество изображения существенно зависит от технологии обработки поверхности подложки, на которую наносится краска. Одной из широко применяемых технологий является плазменная обработка поверхности подложки для 3D-печати. Плазменные технологии используются в разных областях, где возникает необходимость в соединении различных материалов или изменении их поверхностных свойств [4], однако на данный момент в литературе не представлены экспериментальные подтверждения эффективности такой обработки.

В связи с вышеизложенным целью исследования стала экспериментальная оценка влияния плазменной обработки подложки на качество принтерной печати.

Для обработки подложек использовалась установка обработки изделий в низкочастотной плазме невысокого давления. Установка предназначена для очистки, активации и травления поверхности изделий из полупроводниковых и диэлектрических материалов как в плазме остаточной атмосферы, так и в среде аргона либо азота. Для очистки от органических соединений присутствует вероятность подачи реактивного газа (кислорода) [4].

В качестве образца взяли две стеклянные подложки, одну из которых обработали установкой плазменной очистки Multi Plasma Cleaner. Далее с помощью настольного плоттера Sonoplot GIX Microplotter II нанесли 5 линии на каждую подложку [5, 6].

Используя профилометр Profilm 3D, исследовали ширину каждой линии по пяти точкам, значения занесли в табл. 1.

Оптические изображения двух точек на измеряемых линиях с плазменной обработкой и без приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

Статистическая обработка полученных результатов проведена методом однофакторного дисперсионного анализа. Проверялась нулевая гипотеза об отсутствии различий между измеренными значениями ширины линии, полученной без плазменной обработки подложки (группа 2), и после такой обработки (группа 1). В табл. 2 представлены описательные статистики для двух анализируемых выборок.

Методика проведения дисперсионного анализа была подробно описана в статье [7]. Результаты дисперсионного анализа приведены в

табл. 3. Уровень значимости различий между выборками составил  $5 \times 10^{-11}$ .

Таблица 1

**Результаты измерения на линии с и без плазменной обработки**

С плазм. обр. (мкм)				Без плазм. обр. (мкм)			
№ п/п	–	№ п/п	–	№ п/п	–	№ п/п	–
1	1600	14	1700	1	900	14	1400
2	1500	15	1700	2	800	15	1400
3	1500	16	1500	3	1300	16	1200
4	1700	17	1700	4	1600	17	1300
5	1700	18	1600	5	1200	18	1200
6	1700	19	1500	6	800	19	800
7	1400	20	1700	7	800	20	800
8	1700	21	1700	8	1200	21	800
9	1 600	22	1600	9	1 500	22	900
10	1 600	23	1500	10	1 300	23	800
11	1 600	24	1300	11	1 300	24	1 200
12	1 600	25	1400	12	900	25	1 200
13	1 400				900		

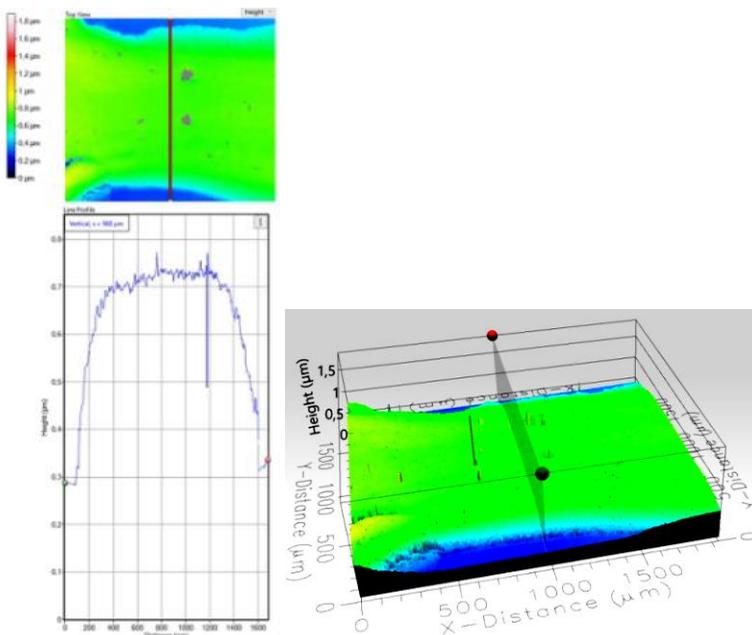


Рис. 1. Оптическое изображение точки измерения на линии с плазменной обработкой подложки

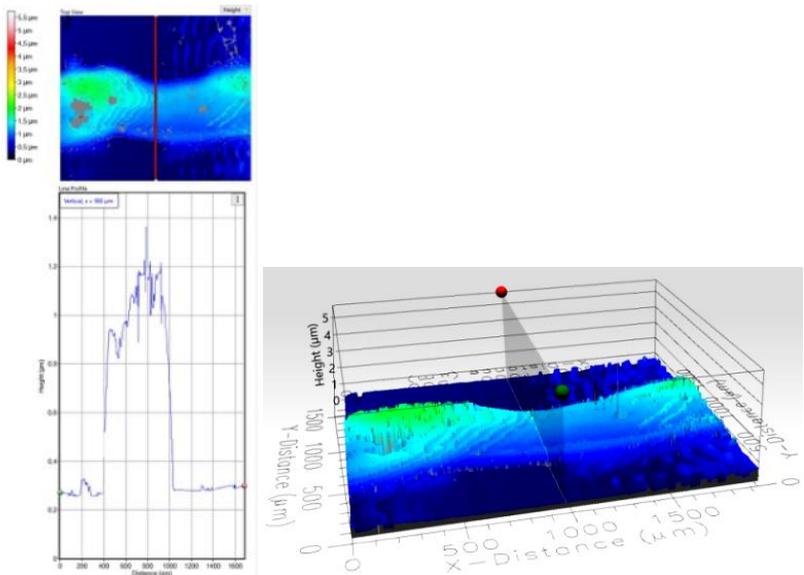


Рис. 2. Оптическое изображение точки измерения на линии без плазменной обработки подложки

Т а б л и ц а 2

**Результаты измерения среднее арифметическое и дисперсия для каждых из групп**

Группа	Количество	Сумма	Среднее	Дисперсия
1	25	39 500	1 580	14 167
2	25	27 500	1 100	66 667

Т а б л и ц а 3

**Результаты дисперсионного анализа**

Источник вариации	SS	df	MS	F	$P_{зн}$	$F_{кр}$
Между гр.	2 880 000	1	2 880 000	71,26	$5 \times 10^{-11}$	4,04
Внутри гр.	1 940 000	48	40 417	—	—	—

В ходе работы установлено, что методом дисперсионного анализа с плазменной очисткой качество векторной печати лучше, чем без плазменной очистки.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Туев В.И. Аддитивные технологии производства устройств радиоэлектроники: учеб. пособие. – Томск: ТУСУР, 2020. – 91 с.
2. Inkjet-Printed Filament for LED Bulbs / К. Afonin, I. Bانشchikova, V. Soldatkin, V. Tuev, A. Schkarupo, Yu. Yulaeva // Ural Symposium on Biomed-

cal Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – 2019. DOI: 10.1109/USBEREIT.2019.8736591.

3. Фадейкина И.Н. Получение электропроводящих изображений методом струйной печати: дис. ... канд. хим. наук. – Москва, 2009. – 146 с.

4. Плазменная очистка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.plasma.com/ru/plasmatechnik/niederdruckplasma/plasma-reinigen/>, свободный (дата обращения: 15.03.22).

5. Sonoplot GIX Microplotter II [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sonoplot.com/microplotter-ii/>, свободный (дата обращения: 15.03.2022).

6. Бюджетный оптический профилометр Profilm3D от Filmetrics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minateh.ru/equipment/analytical-and-metrology/byudzhetnyj-opticheskij-profilometr-profilm3d-ot-filmetrics1/>, свободный (дата обращения: 15.03.2022).

7. Шарифов И.Д. Анализ результатов измерения профилей физических объектов оптическими и механическими методами // Матер. XXVI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2021». – Томск: ТУСУР, 2021. – С. 45.

УДК 628.8

## **АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ДЕЗИНФЕКЦИИ ВОЗДУХА ПОМЕЩЕНИЙ**

*А.Н. Быкова, С.А. Шмидт, студентки каф. РЭТЭМ*

*Научный руководитель В.С. Солдаткин, доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.*

*Проект РЭТЭМ-2001. Антибактериальный полупроводниковый  
источник излучения*

*г. Томск, ТУСУР, alesya-2001@inbox.ru, lana.shmidt.02@mail.ru.*

Излагаются результаты анализа научно-технической и нормативно-методической информации по теме проекта. Предложена конструкция антибактериального полупроводникового источника излучения для дезинфекции воздуха помещений.

**Ключевые слова:** УФ-диод, дезинфекции воздуха, бактерицидная эффективность, бактерицидные источники излучения, обеззараживание воздуха в помещениях.

Целью работы является создание антибактериального полупроводникового источника излучения для дезинфекции воздуха помещений.

Основные задачи работы:

– Анализ научно-технической информации.

– Разработка программы и методик экспериментальных исследований.

– Изготовление макета.

Учитывая последние события, связанные с эпидемией коронавируса, проблема очистки воздуха является намного важнее в наше время, чем раньше. Соответственно, и в сфере производства источников излучения очень сильно развиваются направления, которые ранее не были столь востребованы. Например, ультрафиолетовые светодиоды с кварцевым компаундом, излучающие в коротковолновом UV-C-спектре, который, будучи частью солнечного спектра, обычно становится атмосферой Земли [1]. Такое излучение расходуется для обеззараживания применительно к вирусам, бактериям, грибкам и клещам путём разрушения нуклеиновых кислот и нарушения цепочек ДНК/РНК у микробов. Освещенность с использованием данного диапазона частот используется для дезинфекции разных поверхностей, воды, воздуха и пищи во всех сферах деятельности человека [2]. На данный момент имеется несколько видов дезинфекции помещений, в том числе химическая. В итоге при химической обработке есть некоторая возможность, что отдельные виды вирусов и микроорганизмов впоследствии могут изменить свой вид и показать свою резистивность к тем или иным растворам или их концентрации [3]. Но от УФ микробы и вирусы никакой защиты не имеют. Таким образом, зараза не изменяет свою структуру при непосредственном воздействии жесткого ультрафиолета на ее нуклеиновые кислоты, что в итоге приводит к ее разрушению. Такая дезинфекция воздуха источником ультрафиолетового излучения актуальна как в крупных медицинских учреждениях, так и в сельских фельдшерских пунктах.

Рассмотрим схему рециркулятора воздуха на рис. 1.

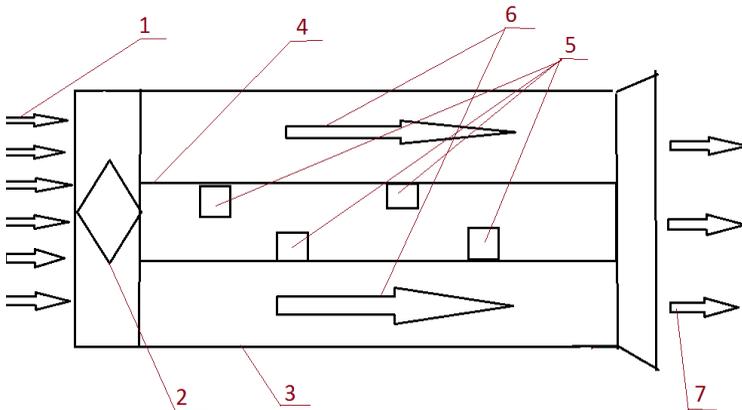


Рис. 1. Схема рециркулятора для обеззараживания помещений

Загрязненный воздух (1) попадает в рециркулятор при помощи вентилятора (2), который закреплен в начале корпуса, изготовленного из пластика, обклеенного металлическим скотчем (3). Затем сильный поток загрязненного воздуха обеззараживается посредством диодов (5), прикреплённых на пластиковую пластину (4) с ультрафиолетовым излучением с длиной волн 275 нм, которое имеет способность разрушать молекулы ДНК вирусов, бактерий и грибов. Воздух, проходя через корпус (6), в помещение выходит обеззараженным (7) [4].

Так как УФ-диоды используются внутри рециркулятора, данное устройство можно использовать, когда в помещении находятся люди. Он совершенно не опасен для живых организмов: людей, животных, растений.

Для офисных и торговых помещений существуют технические решения по комбинированию рециркулятора со светодиодным светильником. Таким техническим решением является светодиодный светильник LS-4BAY-com. Он содержит светодиодный модуль мощностью 200 Вт и модуль очистки (рециркулятор) 15 Вт в одном корпусе. Недостатком данной конструкции является применение в модуле очистки газоразрядных ламп, снижающих срок службы устройства в целом [5].

На основе вышесказанного предлагается техническое решение светодиодного светильника типа «Армстронг» с модулем дезинфекции воздуха на основе УФ-диодов. Такая конструкция позволит повысить срок службы устройства, дополнительно на входе воздуха в модуль очистки предлагается установить фильтр, который будет снижать механическую загрязнённость УФ-диодов и дополнительно осуществлять механическую очистку воздуха от пыли и аэрозольных частиц.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патент на полезную модель № 204740 U1 Российская Федерация, МПК А61L 2/10, А61L 2/24, А61L 2/28. Устройство для обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением: № 2020135049: заявл. 27.10.2020: опубл. 08.06.2021 / В.С. Солдаткин, Т.С. Михальченко, А.О. Шардина, Л.Ш. Юлдашова; заявитель ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

2. Патент на полезную модель № 195810 U1 Российская Федерация, МПК F21V 14/00. Светоизлучающий диод: № 2019130932: заявл. 27.09.2019: опубл. 05.02.2020 / М.В. Андреева, А.А. Вилисов, Е.С. Ганская и др.; заявитель ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

3. Патент на полезную модель № 192891 U1 Российская Федерация, МПК А01G 7/04. Светодиодный облучатель: № 2019115062: заявл. 16.05.2019: опубл. 04.10.2019 / К.Н. Афонин, А.А. Вилисов, Е.Г. Незнамова и др.;

заявитель ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

4.Руководство Р 3.5.1904-04 «Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях». – Минздрав России, 2015.

5. Официальный сайт «ЛЕДОСВЕТ». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ledosvet.com/2020/04/10/дезинфекция-светильник/> (дата обращения: 24.03.2022).

УДК 53.072.8

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ГРАВИРОВКИ НА СТАНКЕ RUKA 1390 ПРЕМИУМ**

***Т.В. Глухова, студент каф. РЭТЭМ***

*Научный руководитель В.И. Туев, зав. каф. РЭТЭМ, проф., д.т.н.*

*Проект ГПО РЭТЭМ-1810. Разработка системы автономного наружного освещения*

*г. Томск, ТУСУР, gltv.02.19@gmail.com*

Поставлена задача изготовления печатных плат методом лазерной гравировки на станке RUKA 1390 ПРЕМИУМ. Проектирование проведено в программном обеспечении «CopperCAM».

**Ключевые слова:** лазерное гравирование, печатная плата, травление, «CopperCAM», RUKA 1390 ПРЕМИУМ.

Печатная плата – пластина из диэлектрика, на поверхности и/или в объеме которой сформированы электропроводящие цепи электронной схемы. Печатная плата предназначена для электрического и механического соединения различных электронных компонентов. Электронные компоненты на печатной плате соединяются своими выводами с элементами проводящего рисунка обычно пайкой.

Существует множество методов создания печатных плат, но на станке RUKA 1390 ПРЕМИУМ используется метод лазерного гравирования. Ультрафиолетовые лазеры способны испарять медь фольги и минимально травмировать диэлектрическую подложку. Это позволяет использовать их для гравирования контуров проводников. Современное оборудование, предназначенное для этой цели, сочетает в себе две лазерные головки: СО-лазер и УФ-лазер, которые попеременно «сверлят» сквозные и глухие отверстия и гравировуют пробельные места плат.

Лазерные методы прямого формирования рисунка высокопроизводительны, воспроизводят рисунок с разрешением проводник/зазор = 0,05/0,05 мм. Лазерный станок – это оборудование, генерирующее

стабильный луч высокой мощности, который падает на поверхность обрабатываемой заготовки малым световым пятном с высокой концентрацией энергии. В точке падения лазер выжигает материал и, в зависимости от настроек устройства, снимает верхний слой платы или создает сквозной рез.

Станок RUKA 1390 ПРЕМИУМ идеально подходит для широкого круга задач. Отличительной чертой данного станка является лазерная трубка мощностью 90W и плата управления Ruida. Модульная направляющая по оси X и Y – 15 мм в сочетании с двигателем Leadshine 57 мм позволяет резать фанеру до 11 мм и осуществлять гравировку на скорости до 800 мм/с. Высококачественная трубка компании Reci W2 обладает длительным сроком работы и обеспечит высокую скорость резки. Комплектация данного станка дополнена профессиональной системой охлаждения S&A CW5200, а также модулем WiFi.

CopperCAM – программа для подготовки данных для гравировки печатных плат. С программой CopperCAM можно импортировать данные в Gerber совместимых форматах, готовить управляющие программы для гравировки контуров дорожек и выборки областей как на всей плате, так и в отдельной области, центровки, сверления и разфрезеровки отверстий, гравировки обозначений, а также вырезки платы по контуру. После подготовки управляющей программы вы можете сделать визуализацию обработки с тем, чтобы убедиться в правильности подготовленной управляющей программы. С CopperCAM вы сможете гравировать как одно-, так и двухсторонние печатные платы.

Для того чтобы спроектировать печатную плату была выбрана готовая принципиальная электрическая схема светодиодной лампы светильника, которая представлена на рис. 1.

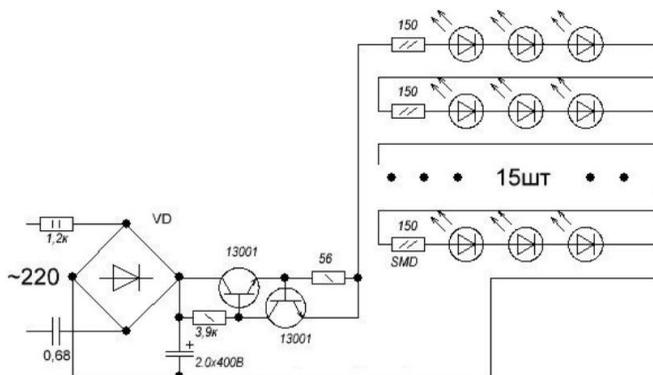


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема светодиодной лампы



Для раствора нам нужно 100 г хлорного железа ( $\text{FeCl}_3$ ) растворить в 300 мл теплой воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

После травления меди нужно удалить остатки защитной краски с печатной платы, это можно сделать при помощи ацетона ( $\text{CH}_3\text{-C(O)-CH}_3$ ).

Затем снова проверяем печатную плату на выявление дефектов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология производства печатных плат [Электронный ресурс]: <https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/tehnologiya-izgotovleniya-pechatnykh-plat-v-kartinkakh/odnostoronnie-pechatnye-platy/> (дата обращения: 15.02.2022).

2. Лазерный станок ruка 1390 премиум [Электронный ресурс]: <https://xn--80aclajncv3асхо2i.xn--p1ai/lazernyj-standart-ruka-1390-premium> (дата обращения: 16.02.2022).

3. Программное обеспечение coppercam [Электронный ресурс]: <https://rdm24.ru/products/software/coppercam-962/> (дата обращения: 16.02.2022).

4. Травление печатной платы [Электронный ресурс]: <https://saifontech.ru/blogs/travlenie-pechatnoj-platy> (дата обращения: 20.02.2022).

5. ГОСТ Р 53429–2009 [Электронный ресурс]: <https://www.rezonit.ru/directory/baza-znaniy/standarty-i-spravochnaya-informaciya/gosty/> (дата обращения: 22.02.2022).

# СОДЕРЖАНИЕ

## СЕКЦИЯ 1

### РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

#### Подсекция 1.1

#### РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

*Председатель – Мелихов С.В., проф. каф. РТС, д.т.н.;*  
*зам. председателя – Аникин А.С., доцент каф. РТС, к.т.н.*

#### *В.А. Иванов*

Программная реализация метода совмещения радиолокационных изображений ..... 19

#### Подсекция 1.2

#### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

*Председатель – Шостак А.С., проф. каф. КИПР, д.т.н.;*  
*зам. председателя – Озёркин Д.В., декан РКФ, к.т.н.*

#### *Д.А. Лужайцев, А.О. Туров, Ю.А. Миллер, Э.О. Лужайцева, Д.С. Хохол*

Анализ параметров маломощного усилителя по технологии нитрида галлия при различной температуре окружающей среды ..... 24

#### *Р.Ю. Подгородецкий*

Исследование влияния ориентации слоёв печати SLM-технологии сплава инконеля 718 на механические свойства ..... 28

#### *А.Е. Целовальникова*

Разработка методики изготовления керамических вставок плавких ..... 32

#### *А.О. Туров, Д.А. Лужайцев, Ю.А. Миллер, Э.О. Лужайцева*

Особенности реализации источника тока в нелинейной модели коммутационного НЕМТ ..... 34

#### *В.О. Мартьянов*

Разработка автономного счетчика времени наработки ..... 37

#### *А.И. Окуневский*

Разработка коммутатора питания для наземного комплекса запуска малых космических аппаратов с повышенными показателями защиты от механических воздействий ..... 40

<b>Д.Е. Понамарев, Н.Н. Кривин</b> Анализ вопроса применимости состояния закрученности радиоволн в качестве дополнительного информативного признака в задачах поляризационной радиолокации .....	43
<b>А.В. Капушак, К.Д. Качанов, А.Н. Коновалова, Г.Э. Родионов, Д.Ю. Семенов, М.Е. Хохленков</b> Разработка устройства сканирования местности на наличие металлов .....	46
<b>А.А. Рябинин, Н.Н. Кривин</b> Использование концепции цифровых двойников в задачах оптимизации базовых несущих конструкций бортовой радиоаппаратуры космических аппаратов по критерию теплообмена .....	49
<b>К.А. Щечилина</b> Тепловыделение в преобразователях напряжения .....	53
<b>Ю.А. Миллер, Д.А. Лужайцев, А.О. Туров</b> Разработка буферного усилителя в диапазоне частот 5–15 ГГц .....	56
<b>Д.Н. Вахрушева</b> Разработка технического решения по обеспечению надежности блока питания магнитометра МА-5 .....	59
<b>К.Ю. Ваулов, Ю.В. Дроздов</b> Применение технологии поверхностного монтажа при серийном изготовлении приборов аппаратуры преобразования и распределения специальных токов .....	63
<b>Л.Ю. Войко, Н.Н. Кривин</b> Общая постановка задачи мультифизического моделирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов для процесса её испытаний на этапах наземной экспериментальной отработки и изготовления .....	66
<b>Н.В. Тамазлыкар, К.Л. Юртанов, Н.С. Усанкин, В.С. Маслов, Л.Ю. Смирнов, Н.А. Гончаров</b> Создание устройства для автосимуляторов .....	69

### **Подсекция 1.3**

#### **РАДИОТЕХНИКА**

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

<b>В.Г. Баканова</b> Исследование фазовращателей на основе фильтрующих схем в САПР Advanced Design System.....	71
<b>И.В. Хмара, В.Г. Нечаев, Д.С. Данилов, А.С. Загородний, О.В. Кравченко</b> Оценка параметров электронного калибратора для векторного анализатора цепей.....	74
<b>С.Н. Росляков, Д.Я. Суханов</b> Аппаратный комплекс для акустической левитации в ультразвуковом поле .....	78

<b>Н.И. Гоголев, Д.С. Брагин, А. Салих</b> Моделирование СВЧ-широкополосного усилителя распределенного усиления на основе GaN-полевых транзисторов.....	81
<b>В.И. Вебер</b> Предобработка базы данных и выбор параметров обучения сверточной нейронной сети для повышения вероятности правильного распознавания объектов на радиолокационном изображении.....	84

#### **Подсекция 1.4**

### **ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

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

<b>В.С. Чебанов</b> Исследование быстродействия модуля PoseNet на микрокомпьютере Jetson Nano .....	90
<b>З.Б. Чимитов</b> Эффективность алгоритмов на основе нейронных сетей для повышения разрешения цифровых изображений .....	93
<b>М.А. Комарницкий</b> Разработка двумерного рекурсивно-сепарабельного пятикаскадного фильтра повышения четкости изображений .....	96
<b>М.А. Комарницкий, А.В. Каменский</b> Оценка быстродействия двумерного рекурсивно-сепарабельного пятикаскадного фильтра повышения четкости изображений .....	99
<b>А.С. Красноперова, Ю.В. Ильин, А.В. Каменский</b> Исследование биомедицинских изображений .....	102
<b>К.А. Аневалов, Р.Е. Макажанов</b> Оценка характеристик цветопередачи видеокамер и цветовоспроизведения мониторов .....	105
<b>А.Н. Шлыкович</b> Сравнение методов повышения пространственного разрешения изображения .....	109

#### **Подсекция 1.5**

### **ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОГО БЕСПРОВОДНОГО ДОСТУПА**

*Председатель – Рогожников Е.В., доцент каф. ТОР, к.т.н.*

<b>М.С. Челпанов</b> Исследование помехоустойчивости систем связи LoRaWAN .....	113
<b>К.В. Диноченко</b> Реализация генератора псевдослучайной последовательности на ПЛИС .....	116

**В.Р. Мавлютова**

Сравнительный анализ технических характеристик SIEM-систем,  
представленных на российском рынке ..... 119

### **Подсекция 1.6**

#### **РОБОТОТЕХНИКА**

*Председатель – Коцубинский В.П., доцент каф. КСУП, к.т.н.*

**Д.А. Анисимов**

Оценка эффективности стратегий программ для робота  
при решении задач лиги RCAP CosPace Rescue ..... 123

**Е.А. Архипова**

Сравнительные характеристики систем охранной сигнализации  
и умного дома для лаборатории ТУСУР ..... 127

### **Подсекция 1.7**

#### **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

*Председатель – Шурыгин Ю.А., директор департамента управления  
и стратегического развития ТУСУРа, зав. каф. КСУП, проф., д.т.н.;*  
*зам. председателя – Черкашин М.В., декан ФВС,  
доцент каф. КСУП, к.т.н.*

**Е.В. Кабанова, А.А. Березин, А.Р. Дягай**

Модификация программы автоматизированного построения  
моделей СВЧ-компонентов ..... 130

**В.А. Бондарь, К.Б.-Б. Дагба, А.И. Степанюга**

Расширение функциональности программного комплекса  
Lines Modelling Toolbox путем дополнения списка моделируемых  
распределенных структур ..... 133

**В.А. Бондарь, К.Б.-Б. Дагба, А.И. Степанюга**

Использование коэффициентов масштабирования  
для отрисовки поперечного сечения линий передач ..... 136

**А.А. Березин, А.Р. Дягай, Е.В. Кабанова**

Модификация программы просмотра и анализа результатов  
СВЧ-измерений ..... 139

**В.С. Швоев, Н.А. Набережнев, А.А. Щедрин**

Реализация пользовательских маркеров  
на основе 2D-графиков SciChart ..... 143

**Ю.А. Новичкова, А.А. Метель, А.А. Щедрин,**

**Н.А. Набережнев, В.С. Швоев**

Получение коммутационного транзистора с использованием  
библиотек моделей элементов для синтеза СВЧ-устройств ..... 146

<b>А.А. Щедрин</b> Реализация алгоритма расчета поля антенны в дальней зоне через значения в ближней зоне в программе антенных измерений на языке программирования С# .....	148
<b>В.С. Швоев, Н.А. Набережнев, А.А. Щедрин</b> Модификация программы просмотра и обработки результатов антенных измерений.....	151
<b>Н.А. Набережнев, А.А. Щедрин, В.С. Швоев</b> Модификация программы по автоматизации антенных измерений .....	154
<b>А.А. Щедрин, Н.А. Набережнев, В.С. Швоев</b> Реорганизация архитектуры модуля расчета поля антенны в дальней зоне через значения в ближней зоне в программе антенных измерений.....	156

## **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.;*  
*зам. председателя – Романовский М.Н., доцент каф. КУДР, к.т.н.*

<b>С.С. Сафонов, Д.М. Морозова, Д.Д. Кривошеина</b> Обзор архитектуры GaN-светодиодов .....	161
<b>Р.А. Кусаинов, А. Неустроев</b> Бесконтактная диагностика и терапия стрессовых состояний человека радиоизотопным методом в среде LabView .....	165
<b>Д.А. Гульков, А.А. Швадленко, С.Г. Еханин</b> Кристалл в дискретном времени .....	168
<b>С.С. Долматова, Д.С. Зайганов, Ю.Ф. Савчук</b> Алгоритм взаимодействия пациента с тренажером когнитивных и речевых способностей.....	172

#### **Подсекция 2.2**

#### **РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ**

*Председатель – Лоцилов А.Г., проректор по научной работе  
и инновациям ТУСУРа, зав. каф. КУДР, к.т.н.;*  
*зам. председателя – Бомбизов А.А., начальник СКБ «Смена», к.т.н.*

<b>Э.Р. Рагимов, С.А. Артищев, С.С. Петров</b> Автоматизация процесса гальванического осаждения меди .....	175
---	-----

<b>Э.Р. Рагимов, С.А. Артищев, Р.М. Гадиров</b> Трехосевой координатограф для аддитивной технологии нанесения материалов .....	178
<b>О.А. Афанасьев, А.Е. Левшин, В.Т. Никитина, А.А. Трофимова</b> Домашняя метеостанция .....	181
<b>Н.С. Труфанова</b> Апробация методики экстракции параметров паст для принтерной технологии .....	184
<b>Н.С. Труфанова, С.А. Айрих, А.Т. Игнатьева, О.В. Кустов</b> Изготовление волновода с применением технологии 3D-печати .....	188
<b>Д.А. Петровых, В.Е. Михайленко, В.А. Чижков, В.А. Исаков, А.Д. Леонтьев, Д.С. Данилов</b> Широкополосный SPDT-переключатель на подложке GaAs в QFN-корпусе .....	191

### **Подсекция 2.3**

#### **ФИЗИЧЕСКАЯ И ПЛАЗМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

*Председатель – Троян П.Е., зав. каф. ФЭ, проф., д.т.н.;  
зам. председателя – Смирнов С.В., проф. каф. ФЭ, д.т.н.*

<b>А.В. Долгова</b> Влияние режимов электронно-лучевого нагрева на распределение тепловых полей в композитной $ZrO_2-Al_2O_3$ керамике .....	195
<b>Е.А. Егоров</b> Разряда в отсутствие эмиссионной сетки в форвакуумном плазменном электронном источнике .....	198
<b>А.А. Зенин, Г.Ф. Марчук</b> Исследование градиента температуры при электронно-лучевом спекании алюмохромной керамики .....	201
<b>Д.А. Шестерикова, А.Е. Шестериков</b> Влияние технологической обработки на параметры барьера Шоттки К n-Si на основе структуры Ti/Ta/Au .....	204
<b>М.А. Свириденко</b> Современные тенденции в мире мемристоров .....	207

### **Подсекция 2.4**

#### **ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

*Председатель секции – Семёнов В.Д., проф. каф. ПрЭ, к.т.н.;  
зам. председателя – Михальченко С.Г., зав. каф. ПрЭ, д.т.н.;  
Оскирко В.О., н.с. лаб. прикладной электроники ИСЭ СО РАН,  
технический директор ООО «Прикладная электроника», к.т.н.*

<b>И.Е. Гедзенко, В.Д. Семёнов</b> Выбор корректирующих звеньев для цифровой системы управления комплекса электропитания автономным объектом .....	211
--	-----

<b>М.А. Кошиаров</b>	
Разработка платы управления газоанализатора для установки плазмохимического синтеза .....	216
<b>Т.В. Лобанова, В.Д. Семёнов</b>	
Математическая модель полумостового резонансного LLC-преобразователя .....	219
<b>Ю.В. Савельев</b>	
Источник питания для светодиодных модулей с управлением по протоколу DALI .....	224
<b>В.А. Шарыгин</b>	
Испытание дросселя для устройства защиты от короткого замыкания ....	229
<b>И.О. Суховерков</b>	
Пусковые моменты в искробезопасных системах питания.....	233
<b>А.Е. Грезева, Е.О. Упорова, В.Д. Семенов</b>	
Построение имитационной модели двухфазного повышающего преобразователя с интерливингом и ее исследование в среде моделирования MatLab Simulink.....	237
<b>К.И. Замира</b>	
Разработка интерфейса устройства заряда и разряда аккумуляторной батареи на микроконтроллере ESP32 Wrover-B .....	240

### **Подсекция 2.5**

#### **ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАНОФОТОНИКА И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА**

*Председатель – Шарангович С.Н., проф., зав. каф. СВЧиКР, к.ф.-м.н.;*  
*зам. председателя – Перин А.С., доцент каф. СВЧиКР, к.т.н.*

<b>А.Е. Александров, Ю. Новиков, А.Д. Безпалый</b>	
Моделирование распространения оптического излучения в волноводных структурах, формируемых в поверхностно легированном кристалле ниобата лития .....	243
<b>Д.В. Кузнецов, А.А. Черный, Д.В. Окунев</b>	
Исследование формирования и изучение оптических неоднородных структур в кристалле ниобата лития .....	245
<b>В.О. Васюкевич, Н.А. Корсаков, А.М. Добрянский</b>	
Выявление кристаллографического направления [110] в образце силиката висмута среза (110) методами голографической интерферометрии .....	247

### **Подсекция 2.7**

#### **СВЕТОДИОДЫ И СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА**

*Председатель – Туев В.И., зав. каф. РЭТЭМ, проф., д.т.н.;*  
*зам. председателя – Солдаткин В.С., доцент каф. РЭТЭМ, к.т.н.*

<b>М.В. Андреева</b>	
Исследование отклонения цвета СИЭ от нормы в шагах МакАдама.....	250

<b>А.А. Егорова</b>	
Интеллектуальная навигационная система освещения водных путей .....	253
<b>М.Х. Фам</b>	
Инкубатор для выращивания кур в домашних условиях .....	256
<b>И.В. Кузнецов</b>	
Светодиодный излучающий элемент .....	258
<b>Д.Б. Тудупова, А.А. Максименко</b>	
Применение цифрового двойника в области светотехники для растений	261
<b>В.Д. Микеладзе</b>	
Распылительная форсунка для аэрозольного принтера .....	264
<b>И.Д. Шарифов</b>	
Оценка влияния технологической операции плазменной обработки на очистку поверхности подложки для 3D-печати .....	266
<b>А.Н. Быкова, С.А. Шмидт</b>	
Антибактериальный полупроводниковый источник излучения для дезинфекции воздуха помещений .....	270
<b>Т.В. Глухова</b>	
Изготовление печатных плат методом лазерной гравировки на станке RUKA 1390 ПРЕМИУМ .....	273



*Научное издание*

# **НАУЧНАЯ СЕССИЯ ТУСУР–2022**

**Материалы  
Международной научно-технической конференции  
студентов, аспирантов и молодых ученых  
«Научная сессия ТУСУР–2022»**

**18–20 мая 2022 г., г. Томск**

**В трех частях**

Часть 1

Корректор – **В.Г. Лихачева**  
Верстка **В.М. Бочкаревой**

---

Издательство «В-Спектр».  
Сдано на верстку 15.04.2022. Подписано к печати 05.06.2022.  
Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печать трафаретная. Печ. л. 17,9  
Тираж 100 экз. Заказ 6.

---

Издано ТУСУР, г. Томск, пр. Ленина, 40, к. 205, т. 70-15-24  
(для нужд всех структурных подразделений университета и авторов)

Издательство «В-Спектр».  
634055, г. Томск, пр. Академический, 13-24, т. 8 905 089 92 40  
E-mail: [bvm@sibmail.com](mailto:bvm@sibmail.com)